



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

KALLE RUUTH  
LED-VALAISTUKSEN PALOTURVALLISUUS SEKÄ ERI VALAISIN-  
RATKAISUIDEN VERKKOVAIKUTUKSET

Diplomityö

Tarkastajat: tutkijatohtori Jenni Re-  
kola ja projektipäällikkö Pertti Pako-  
nen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
28. helmikuuta 2018

## TIIVISTELMÄ

**KALLE RUUTH:** Led-valaistuksen paloturvallisuus sekä eri valaisinratkaisuiden verkkovaikutukset

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 112 sivua, 5 liitesivua

Toukokuu 2018

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tehoelektroniikka

Tarkastajat: tutkijatohtori Jenni Rekola ja projektipäällikkö Pertti Pakonen

Avainsanat: Led, sähköverkkoympäristö, turvallisuus, valaistus

Valaistusmarkkinat ovat suuressa murroksessa nopeasti yleistyvän led-tekniikan myötä. EU-direktiivin johdosta kaikki hehkulamput, joiden teho ylitti 7 W, poistuivat markkinoilta 2012 ja tilalle on tullut pienloistelamppuja sekä led-lamppuja. Led-lamppuja pidetään automaattisesti paloturvallisina niiden tuottaman pienemmän häviötehon sekä matalan jännitetasen johdosta. Vaikka led-tekniikka on vasta yleistymässä, uusi teknologia on jo ehtinyt aiheuttaa vakavia sähkö- ja paloturvallisuusriskejä.

Tutkimus toteutettiin neljässä vaiheessa: kirjallisuus-, laboratorio-, kysely- sekä kenttä-tutkimuksena. Teoriaosuudessa vertaillaan erilaisia valaisintekniikoita sekä valaistuksen valintaan vaikuttavia tekijöitä. Laboratoriotutkimuksessa tutkitaan eri valaistustekniikoiden käyttäytymistä erilaisissa sähköverkkoympäristöissä ja tämän vaikutusta valaisimien lämpötilaan. Kyselytutkimuksessa analysoidaan sähköalan ammattilaisten vastauksia heille lähetettyyn kyselyyn. Kenttätutkimuksessa tehtiin mittauksia mm. valaisinsaneerauskohteisiin, joissa vanha valaistus vaihdettiin led-tekniikkaa hyödyntävään valaistukseen.

Tutkimuksen tavoitteena oli kartoittaa valaistukseen liittyviä palo- ja sähköturvallisuusriskejä. Keskeisenä tavoitteena oli tutkia led-lamppujen sekä elektronisten liitäntälaitteiden käyttäytymistä ja vuorovaikutuksia erilaisissa sähköverkkoympäristöissä. Tutkimuksen tulosten pohjalta tuotettiin ohjeistusta ja tietoisuutta paloturvallisen valaistuksen suunnitteluun, asennukseen sekä ylläpitoon liittyen. Tutkimustulosten pohjalta ideoitiin myös teknisiä ratkaisuja ja menetelmiä valaistuksen kunnonvalvontaan, joilla valaistukseen liittyviä sähkö- ja paloturvallisuusriskejä pystyttäisiin havaitsemaan ajoissa.

Tutkimuksen tuloksena voidaan todeta, että valaistus on hyvin suuri palo- ja sähköturvallisuuteen vaikuttava tekijä. Suurin yksittäinen turvallisuusriski on vanhojen loistevalaisimien kuristin. Led-valaistus on pääsääntöisesti turvallisempi kuin vaihtoehtoiset valaistusratkaisut, mutta led-valaisimissakin on vielä paljon puutteita. Asennusohjeiden puutteellisuus antaa mahdollisuuden asentaa valaisimet vaarallisesti, mutta ohjeiden mukaisesti. Led-valaisimista on tällä hetkellä hyvin vaikea tietää, mikä valaisin on laadukas ja turvallinen. Led-tekniikkaa hyödyntävien valaistusratkaisujen laaja kirjo yhdistettynä valaisinten turvallisuuspuutteisiin sekä riittämätön ymmärrys tekniikan toiminnasta voi aiheuttaa ongelmia niin sähköverkkoon, kuin käyttäjien turvallisuudelle.

## ABSTRACT

**KALLE RUUTH:** Fire safety of LED lighting and effect of lighting solutions to distribution network

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 112 pages, 5 Appendix pages

May 2018

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Power Electronics

Examiners: Postdoctoral Researcher Jenni Rekola and Project Manager Pertti Pakonen

**Keywords:** Led, lighting, power grid environment, safety

Lighting market is facing a major breakthrough with the rapidly expanding LED technology. As a result of the EU directive, all incandescent bulbs with a power exceeding 7 W were removed from the market in 2012 and the replacing technologies, compact fluorescent bulbs and LED bulbs have taken their place. The LED bulbs are automatically assumed to be fireproof as they produce lower power losses and are using low DC voltage to operate. Although LED technology is just emerging, the new technology has already caused serious electrical and fire safety risks.

This research was carried out in four phases: literature, laboratory, survey and field research. The theoretical part compares different lighting techniques and factors affecting the choice of lighting equipment. The laboratory study investigates the behavior of different lighting techniques in different electrical network environments and its effect on the temperature of the luminaires and bulbs. The questionnaire survey analyzes the responses of electricity professionals to the survey sent to them. The field study carried out practical measurements at locations, where lighting renovation was carried out by replacing old lighting equipment with LED lights.

The main target of this study was to find fire and electrical safety risks related to lighting. The primary aim was to study LED lights and electronic ballasts and their operation and interaction in different power grid conditions. Based on the results of the research, the aim was to provide better guidance and awareness on the design, installation and maintenance for fireproof lighting. Technical solutions and methods for lighting condition monitoring were developed to detect the electrical and fire safety risks in time and prevent them.

As a result of the research, it can be stated that lighting is very important factor for fire- and electrical safety. The biggest safety risk is the magnetic choke of the fluorescent lamp. In general, the LED lighting is safer than alternative lighting solutions, but there are still many problems in the LED lights. Inadequate installation instructions allow the lamps to be mounted dangerously but still according to the instructions. For the moment, it is very difficult to determine which LED lighting solution is safe and high-quality product. A wide spectrum of lighting solutions utilizing LED technology combined with the safety deficiencies of the luminaires and an inadequate understanding of the operation of the technology can cause problems for power grid and for the personal safety.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty riippumattomana IF Vahinkovakuutusyhtiön toimeksiannosta maaliskuun 2017 ja huhtikuun 2018 välisenä aikana. Tutkimuksen rahoittivat Palosuojelurahasto, Sähköturvallisuuden edistämiskeskus STEK ry sekä Ulla Tuomisen säätiö.

Työn tarkastajana Tampereen teknillisen yliopiston puolesta toimi tutkijatohtori Jenni Rekola sekä projektipäällikkö Pertti Pakonen. Haluan kiittää heitä asiantuntemuksesta, avusta sekä työn kommentoinnista.

Haluan kiittää Juha Alhaista avusta kyselytutkimuksen tuottamisessa. Haluan kiittää lisäksi kaikkia tutkimukseen aikaansa ja materiaalia luovuttaneita tahoja. On ollut hienoa huomata, kuinka suuren kiinnostuksen tutkimus on saanut sähköalan ammattilaisten keskuudessa. Haluan kiittää myös Antti Hildenä, joka oli jokaisessa kenttätutkimuksessa mukana.

Lisäksi erityiskiitos avopuolisolleni Katille sekä perheenjäsenille jatkuvasta kannustuksesta ja tuesta koko opiskelujeni ajan.

Tampereella, 23.5.2018

Kalle Ruuth

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	8
2.	SÄHKÖN LAATU.....	9
2.1	Sähkön laatuun vaikuttavia tekijöitä.....	9
2.1.1	Yliaallot.....	10
2.1.2	Jännitetason vaihtelut .....	13
2.1.3	Käyttökeskeytys.....	14
2.1.4	Transientit.....	15
2.1.5	Taajuuden vaihtelu.....	15
2.1.6	Välkynnän häiritsevyysindeksi .....	16
2.1.7	Jakelujännitteen epäsymmetria ja kuormituksen epäbalanssi .....	16
2.1.8	Loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus.....	18
2.1.9	Supraharmoniset .....	20
3.	VALAISTUKSEEN LIITTYVÄT TUNNUSLUVUT .....	22
3.1	Valovirta.....	23
3.2	Valaistusvoimakkuus .....	23
3.3	Valotehokkuus.....	23
3.4	Ekvivalentti värilämpötila .....	24
3.5	Värintoistoindeksi.....	24
3.6	Elinikä .....	25
3.7	Suojausluokka .....	25
3.8	Fotometrinen koodi.....	27
4.	TYYPILLISIMMÄT VALAISTUSTEKNIIKAT .....	28
4.1	Loistelamppu .....	28
4.2	Halogeenilamppu.....	31
4.3	Monimetallilamppu.....	32
4.4	Energiansäästölamppu .....	34
4.5	Led-lamppu .....	36
4.5.1	Liitäntälaite.....	38
4.5.2	Led-valoputket.....	43
4.5.3	Korvaavat led-lamput.....	44
4.5.4	Led-valaisimet .....	45
5.	LABORATORIOTUTKIMUKSET.....	46
5.1	Laboratoriomittaukset.....	47
5.2	Valonlähteiden ja valaisinten vaatimustenmukaisuus .....	54
5.3	Valonlähteiden ja valaisinten turvallisuuden parantaminen .....	55
6.	KENTTÄTUTKIMUKSET .....	58
6.1	Mittauskohde 1, Ylöjärvi .....	59
6.2	Mittauskohde 2, Kouvola.....	61
6.3	Mittauskohde 3, Turku.....	73
6.4	Mittauskohde 4, Pori.....	81

6.5	Mittauskohde 5, Kuopio.....	86
7.	KYSELYTUTKIMUS JA TILASTOT .....	89
7.1	Kyselytutkimus.....	89
7.2	PRONTO-järjestelmän tulokset valaistuksen osalta.....	97
8.	YHTEENVETO.....	98
	LÄHTEET .....	101

## LIITE 1: WEBROPOL-KYSELY SÄHKÖALAN AMMATILAISILLE

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	engl. Alternating Current, vaihtovirta
AJK	aikajälleenkytkentä
Al	alumiini
AMR	engl. Automatic Meter Reading, energiamittarien etäluenta
CCM	engl. Continuous conducting mode, jatkuva johtavuustila
CE	ranks. Conformité Européenne, vaatimustenmukaisuusmerkintä
CIE	ranks. Commission Internationale de l'Eclairage, kansainvälinen valaistuskomissio
Cu	kupari
DC	engl. Direct Current, tasavirta
DCM	engl. Discontinuous conducting mode, epäjatkuva johtavuustila
DPF	engl. Distortion Power Factor, häiriöiden tehokerroin
E	valaistusvoimakkuus, yksikkö luks (lx)
EMC	engl. Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
EMI	engl. Electromagnetic Interference, sähkömagneettinen häiriö
EN	engl. European Norms, eurooppalainen standardi
ENEC	engl. European Norms Electrical Certification, eurooppalainen puolueeton testauslaitos
eV	elektronivoltti
$f$	taajuus, yksikkö hertsi (Hz)
I	virta, yksikkö ampeeri (A)
IEC	engl. International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
InGaN	indiumgalliumnitridi
IP	engl. International Protection, kansainvälinen suojausluokitus
IR	infrapuna
LED	engl. Light Emitting Diode, hohtodiodi
LOR-luku	käyttöhyötysuhde
P	pätöteho, yksikkö watti (W)
PF	engl. Power Factor, tehokerroin
PFC	engl. Power Factor Correction, tehokertoimen korjauspiiri
PJK	pikajälleenkytkentä
PLC	engl. Power Line Communication, sähköverkkotiedonsiirto
PLL	engl. Phase Locked Loop, vaiheenlukitussilmukka
PRONTO	pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto
Q	loisteho, yksikkö vari, (VAr)
$R_a$	värintoistoindeksi
RGB	engl. Red, Green, Blue, punainen, vihreä, sininen
S	näennäisteho, yksikkö voltiampeeri (VA)
SiC	piikarbidi
T	lämpötilasuure, yksikkö kelvin (K)
THD	engl. Total Harmonic Distortion, kokonaissärö
TPF	engl. True Power Factor, todellinen tehokerroin
Tukes	turvallisuus- ja kemikaalivirasto
U	jännite, yksikkö voltti (V)
UV	ultravioletti
VPE	verkkopalveluehto

ZnSe	sinkkiseleeni
$\lambda$	aallonpituus
$\Phi$	valovirta, yksikkö lumen (lm)
$\eta$	valotehokkuus, yksikkö lumen/watti (lm/W)



# 1. JOHDANTO

Suomessa syttyy joka vuosi yli 1000 rakennuspaloa, joiden aiheuttajana on sähkö. Sähköpalolla tarkoitetaan sellaista tulipaloa, jonka suorana syttymislähteenä on ollut sähköenergia. Sähköpalon voi aiheuttaa yksittäinen laite tai sähkölaitteisto. Suurin osa sähköpaloista olisi ehkäistävissä huolellisilla ennakkoilla tarkastuksilla, sillä suurin osa sähkö aiheuttamista paloista oireilee jo ennen syttymistään. Oireita kuitenkin voi olla vaikea havaita. Erilaisia helposti huomattavia oireita ovat mm. valaisimesta kuuluva hurina, laitteistoista kuuluvat epämääräiset äänet sekä laitteen tuottama käry. Valojen vilkkuminen sekä valotehon lasku saattaa olla indikaattori laitteistossa kytevästä ongelmasta. Lisäksi mikäli tietyistä laitteesta saa usein erilaisissa olosuhteissa pienen sähköiskun, todennäköisesti laitteen suojamaadoituksessa ei ole kaikki kunnossa [1].

Sähkötuotteissa vaarallisten tuotteiden määrä on viime vuosien aikana kasvanut huomattavasti. Tätä kasvua selittää lähinnä led-valaistustuotteiden eksponentiaalinen kasvu sekä muiden pienoisjännitteellä toimivien laitteiden yleistymisen ja laitekokojen pienentyminen. Nykyään tuotteet tulevat ensin myyntiin, jonka jälkeen Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes) tekee pistotarkastuksia tai asiakkaiden ilmoituksesta testaa laitteiden turvallisuuden. Sähköturvallisuuden näkökulmasta pienoisjännitteellä toimivissa laitteissa on havaittu paljon puutteita syöttävän 230 voltin (V) vaihtojännitteen eristyksestä pienoisjännitteestä. Tällöin on vaarana, että pistorasian 230 V jännite pääsee suoraan pienoisjännitepuolelle ja tätä kautta laitteen kosketeltaviin osiin. Vuonna 2012 yli puolessa Turvallisuus- ja kemikaaliviraston tarkastuksessa palautusmenettelyyn joutuneessa tuotteessa oli tällaisia puutteita [2]. CE-merkintä ei takaa laitteiden turvallisuutta ja merkintä on myös helppo sekoittaa siitä tehtyyn jäljitelmään, ns. China Export-merkintään.

Sähköpaloista on tehty runsaasti tutkimuksia ja selvityksiä myös vakuutusyhtiöiden toimesta. Finanssialan keskusliiton tilastoiden mukaan, n. 24 % kaikista suurvahingoista (korvaus yli 200 000 €) on sähköpaloja. If Vahinkovakuutusyhtiön tilastojen mukaan vuosien 2008-2015 aikana 33 % suurvahingoista on sähköpaloja. Näistä valaistuksen aiheuttamien sähköpalojen osuuden on arvioutu olevan hyvin suuri [3].

Tutkimuksen tavoitteena on kehittää turvallisen valaistuksen suunnitteluun, asennukseen sekä ylläpitoon liittyvää ohjeistusta huomioiden valaisimien käyttöympäristön sekä sähköverkkoympäristön ja siihen liitettyjen laitteiden ominaisuudet. Tutkimuksessa pyritään myös ideoimaan teknisiä ratkaisuja ja kunnonvalvontamenetelmiä, joilla valaistuksen turvallisuusriskejä pystyttäisiin eliminoimaan ja esimerkiksi ikääntymisen tuomia ongelmia pystyttäisiin tunnistamaan ajoissa.

## 2. SÄHKÖN LAATU

Ideaalisessa sähköverkossa jännite ja virta ovat sinimuotoista. Tähän ei kuitenkaan yleensä päästä. Sähköverkossa esiintyy häiriöitä, joita voivat aiheuttaa sähköntuottajat ja kuluttajat. Yleisimmin häiriöt johtuvat kuluttajista. Yleisimpiä ongelmia aiheuttavia häiriötyyppejä ovat virta- ja jännitetransientit, yliaallot sekä jännitetasen muutokset. Pahimmillaan häiriöt voivat aiheuttaa sähkökatkoksia, jotka voivat olla tuotannon prosesseista riippuen hyvinkin kalliita yritykselle.

Yleisesti sähkönlaatu ymmärretään toimitusvarmuuden ja jännitteen laadun muodostamana kokonaisuutena. Sähkön käyttäjälle yleisimpiä sähkön laadun aiheuttamia ongelmia ovat laitteiden lyhentyneet eliniät, hajoamiset, välkyntä sekä kohonneet loistehomaksut. Suurimmat sähkön laatuun vaikuttavat tekijät ovat koko ajan kasvamassa olevat epälineaariset kuormatyypit, kuten taajuusmuuttajat ja hakkuriteholähteet, tietokoneet, muuntajien ja kompensointilaitteistojen huoltojen puute ja yleisesti sähköverkon kuormituksen suuri kasvu [4]. Valaistusratkaisut, hehkulamppua lukuun ottamatta ovat myös epälineaarista kuormitusta. Uudet valaistustekniikat ovat herkkiä sähköveron häiriöille; häiritsevät verkossa olevia laitteita sekä häiriintyvät herkästi.

Jakeluverkkoyhtiöitä sekä jakeluverkkoon kytkettäviä sähkölaitteita ohjaavat monet standardit ja säädökset. Sähköturvallisuuslaissa STL 410/1996 määritellään laitteille vaatimukset: ”Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava käytettävä niin, että:

- 1) niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa
- 2) niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä
- 3) niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti [5, 6]”

Verkkopalveluehdoissa mainitaan, että jos käyttäjän sähkölaitteen tai -laitteiston aiheuttamille verkkohäiriöille ei ole olemassa kyseiseen tapaukseen soveltuvia standardeja, verkonhaltijan on käyttäjän pyynnöstä selvitettävä, voidaanko laite tai laitteisto liittää kyseiseen sähköverkkoon [7].

### 2.1 Sähkön laatuun vaikuttavia tekijöitä

SFS-EN 50160 on standardi, joka määrittelee jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuuksia. Standardissa määritellään raja-arvoja verkon yleisimmille suureille. SFS-EN 50160 standardissa on esitetty vaatimuksia vain jännitteelle, siinä ei ole käsitelty virtaa tai tehosuureita laisinkaan.

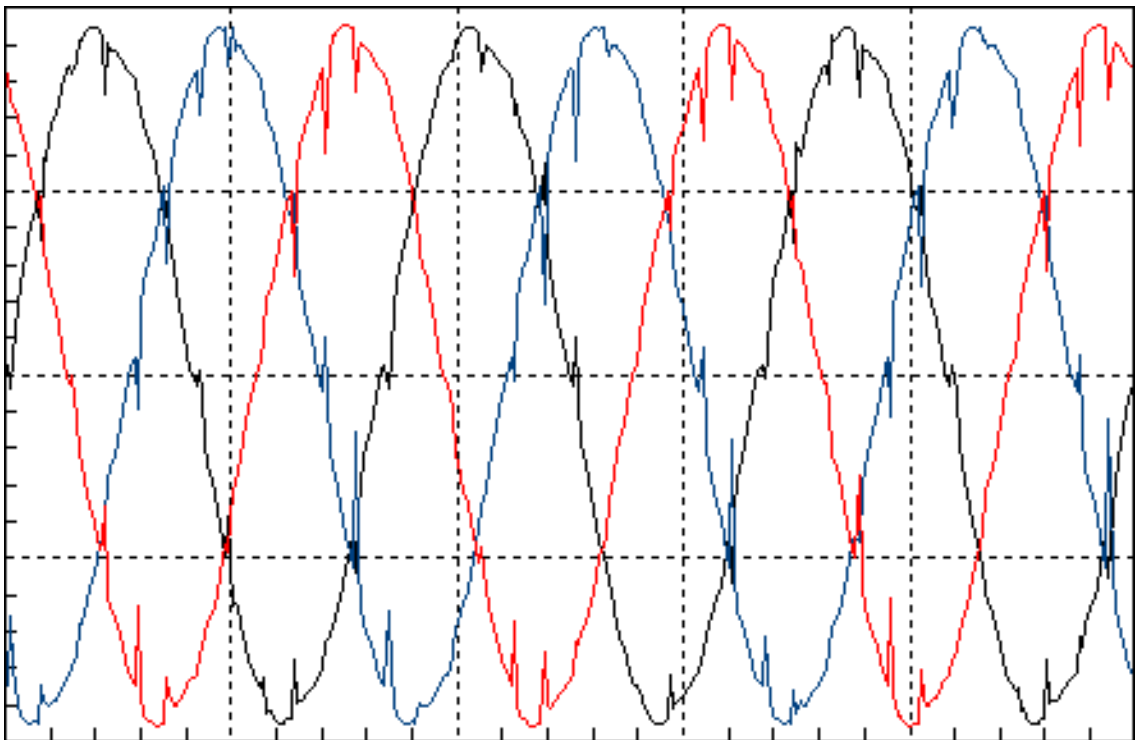
Standardin mukainen nimellisjännite  $U_n$  on yleisessä pienjänniteverkossa 230 V, joko vaiheen ja nollan välillä, tai vaiheiden välillä seuraavasti:

- Nelijohtimiselle kolmivaihejärjestelmälle:  
 $U_n = 230$  V vaiheen ja nollan välillä
- Kolmijohtimiselle kolmivaihejärjestelmälle:  
 $U_n = 230$  V vaiheiden välillä [8].

Häiriölajit voidaan jakaa kahteen pääryhmään, johtuvasti- ja sähkömagneettisesti kytkeytyviin häiriöihin. Johtuvia häiriötyyppejä ovat: Maadoitusviat, jännitekatkot, epäsymmetria, jännitetason vaihtelut, yliaallot sekä poikittaiset- ja pitkittäiset transientit. Sähkömagneettisia häiriöitä ovat: radiotaajuiset häiriöt, jännitteiden aiheuttamat sähkökentät sekä virtojen aiheuttamat magneettikentät [9].

### 2.1.1 Yliaallot

Yliaallot voidaan jakaa kahteen osaan, harmonisiin- ja epäharmonisiin yliaaltoihin. Kuvassa 1 on esitetty yliaaltojen vaikutukset jännitteen käyrämuotoon.



**Kuva 1. Säröytyneen jännitteen käyrämuoto [10, muokattu]**

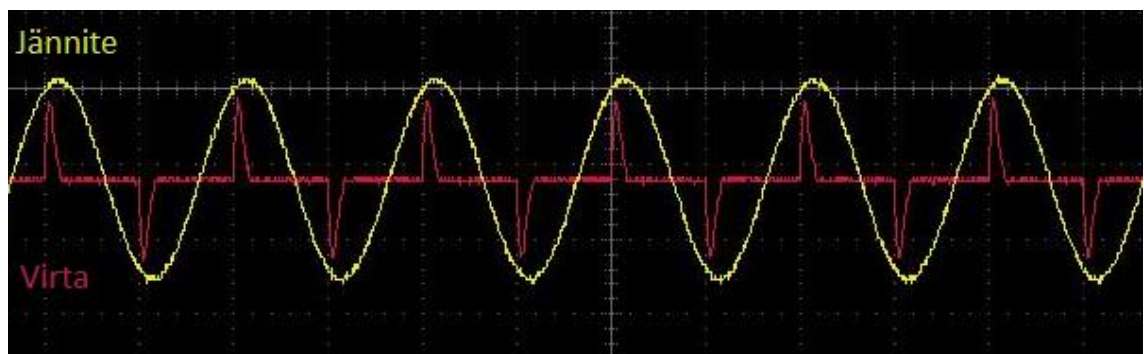
Normaaleissa käyttöolosuhteissa kunkin viikon mittaisen mittausjakson aikana, 95 % jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin taulukossa 1 esitetty arvo [11].

**Taulukko 1. SFS-EN 50160 mukaiset harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut raja-arvot**

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (Uh)	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (Uh)	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (Uh)
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Resonanssit voivat aiheuttaa suurempia jännitteitä yksittäiselle harmoniselle. Tämän lisäksi kokonaissärökertoimen (järjestyslukuun 40 saakka) tulee olla maksimissaan 8 %. Epäharmonisten yliaaltojännitteiden taso on koko ajan kasvamassa. Tämä johtuu taajuusmuuttajien ja vastaavien säätölaitteiden lisääntymisestä [12].

Harmonisia yliaaltoja aiheuttavat mm. tasasuuntaajat, muuntajat, taajuusmuuttajat, tyristorihjatut kuormat sekä loiste- ja led-lamput. Alla olevassa kuvassa 2 on esitetty tyypillisen epälineaarisen kuorman eli yksivaiheisen diodisillan käyrämuoto. Harmoniset yliaallot ovat perustaajuuden kerrannaisia. Harmoniset yliaallot summautuvat verkkotaajuuden päälle ja aiheuttavat ylimää räisiä häviöitä laitteissa. Epälineaaristen kuormien ottama epäsinimäinen virta aiheuttaa sähköverkon impedanssin seurauksena myös jännitteen säröytymisen. Tehoelektroniikka yleistyy koko ajan mm. uusiutuvassa energiantuotannossa, valaistuksessa ja sähköautojen latauksessa käytettävien tehoelektroniikkalaitteiden johdosta. Näiden myötä yliaallot ovat kasvava ongelma [13].



**Kuva 2. Epälineaarinen kuorma, led-nauha**

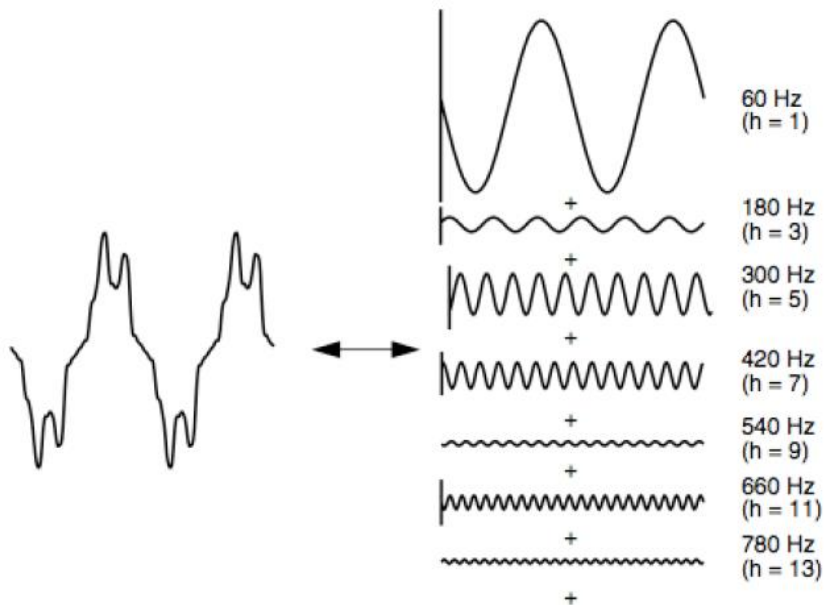
Harmoniset yliaallot voivat voimistua sarja- ja rinnakkaisresonansseissa. Yliaallot aiheuttavat myös eristeiden ennenaikaista vanhenemista ja lyhentävät komponenttien elinikää. Herkät laitteet voivat myös vahingoittua yliaalloista. Lisäksi niistä aiheutuu EMC-häiriöitä, värinää, meluhaittoja sekä lisääntyneitä häviöitä muuntajissa, kuristimissa sekä moottoreissa.

Epäharmonisia yliaaltoja aiheutuu epälineaarisista kuormista, mutta toisin kuin kuvassa 2, virran aaltomuoto ei seuraa jännitteen jaksoja. Epäharmoniset eivät ole perustaajuuden kerrannaisia. Epäharmoniset yliaallot ovat kasvamassa ja ne voivat aiheuttaa mm. välkyntää [14].

Fourier-analyysillä jaksolliset funktiot voidaan esittää yhden tai useamman sinifunktion summana. Tulokseksi saadaan yhtälö (1), jonka komponenttien kertoimet kertovat eri taajuuskomponenttien esiintymisen kokonaissignaalin.

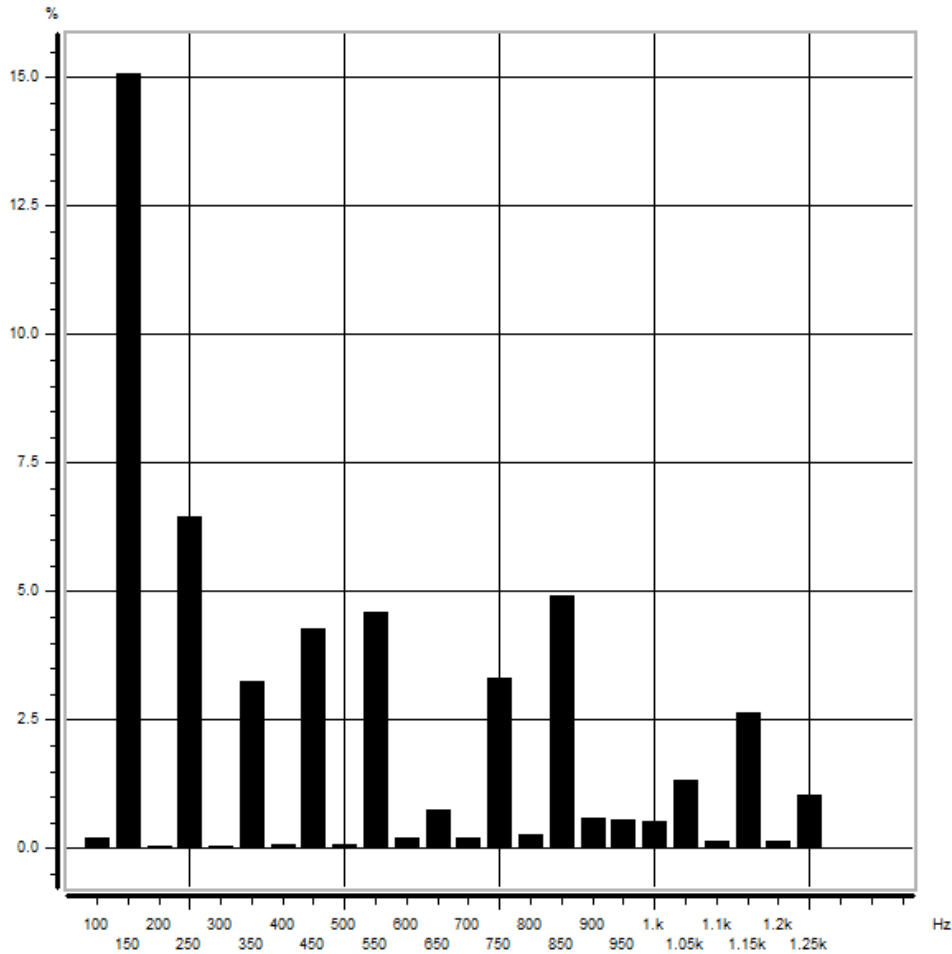
$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

Yhtälössä  $\omega$  on kulmataajuus,  $F$  on Fourier-muunnettu signaali taajuustasossa ja  $f$  on alkuperäinen signaali aikatasossa. Kuvassa 3 on esitetty Fourier'n menetelmällä saatu käyrämuoto sekä käyrämuodon sisältämät taajuuskomponentit [14].



**Kuva 3. Fourier'n sarjakehitelmällä muodostettu säröytynyt aaltomuoto ja sen komponentit [15]**

Harmoninen spektri on hyvin yleinen tapa analysoida yliaaltopitoisuuksia jännitteissä ja virroissa. Kuvassa 4 on esitetty loistevalaisinryhmän vaihevirran yliaaltopitoisuus. Kuvassa ei näy perustaajuista komponenttia (50 Hz).



**Kuva 4. Loistevalaisinlähden yliaaltopitoisuus**

Signaalin harmonista kokonaissärö (THD) kuvaa perustaajuutta suurempien harmonisten yliaalto-taajuuksien kokonaismäärän. THD voidaan laskea yhtälön (2) avulla.

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{F_n}{F}\right)^2} \quad (2)$$

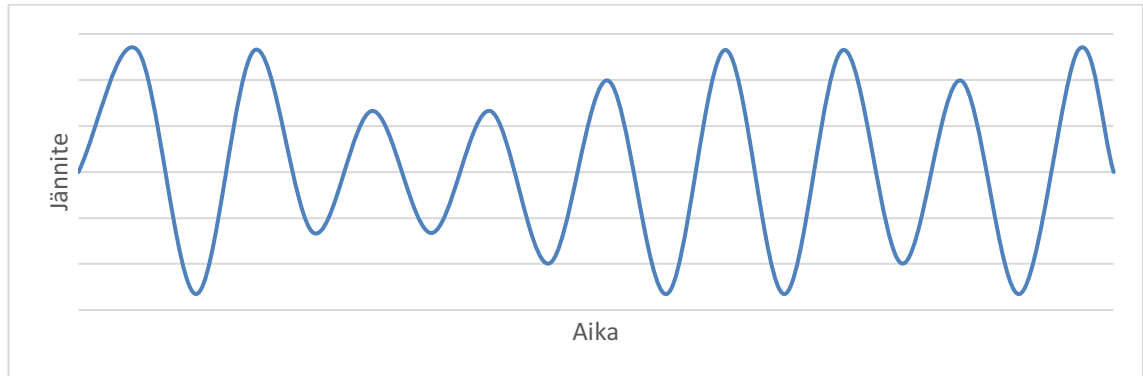
Yhtälössä  $F_n$  on n:n harmonisen yliaallon komponentin tehollisarvo ja  $F$  on signaalin perustaajuuden tehollisarvo [16].

### 2.1.2 Jännitetason vaihtelut

Standardin SFS-EN 50160 mukaan, normaaleissa käyttöolosuhteissa, pois lukien keskeytysjaksot, jännitetaso ei saisi vaihdella yli  $\pm 10 \%$  nimellisjännitteen arvosta. Syrjäseutujen verkon käyttäjillä sallitaan hieman suurempi vaihtelu,  $+10 \%$  /  $-15 \%$ .

Jakelujännitteen nopeat muutokset aiheutuvat pääasiassa asiakkaan verkossa tapahtuvista kuormitusmuutoksista, järjestelmässä tehdyistä kytkennöistä tai vioista. Mikäli jännitemuutos ylittää jännitekuopan tai ylijännitteen havahtumiskynnyksen, tapahtuma luokitellaan jännitekuopaksi tai ylijännitteeksi ennemmin kuin nopeaksi jännitemuutokseksi.

Jännitetasoon vaikuttaa sähköasemilla olevat jännitteensäätäjät sekä verkon mitoitus ja kuormitus tilanne [8]. Kuvassa 5 on esitetty jännitetason vaihtelut. Jännitetaso voi nousta tai laskea hyvinkin nopeasti.

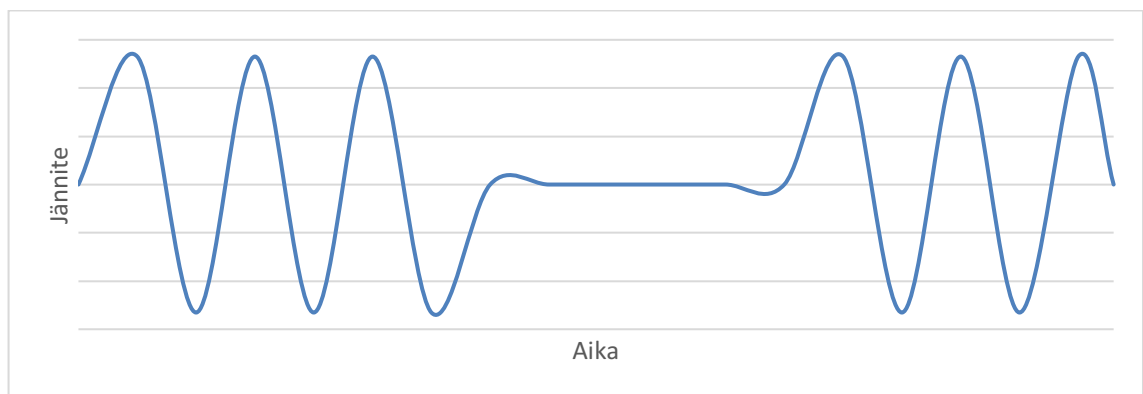


**Kuva 5. Jännitetason vaihtelut**

Nopeat jännitetason vaihtelut johtuvat yleensä epäsymmetrisistä vioista tai esim. suurien kuormituksien kytkeytymisistä päälle ja pois [16]. Jännitetason vaihtelut voivat myös johtua verkossa esiintyvän loistehon määrästä. Mikäli loistehoa on liian vähän, verkon jännite laskee, kun taas liiallinen loisteho nostaa jännitetasoa.

### 2.1.3 Käyttökeskeytys

Yksi yleisimmistä häiriöistä on sähkön käyttökeskeytys. Yleisimmin keskeytys johtuu keskijänniteverkon avojohtolinjoilla tapahtuvasta viasta. Keskeytys voi myös johtua häiriöstä tai korjaustyöstä. Kuvassa 6 on esitetty verkon jännitekatko.



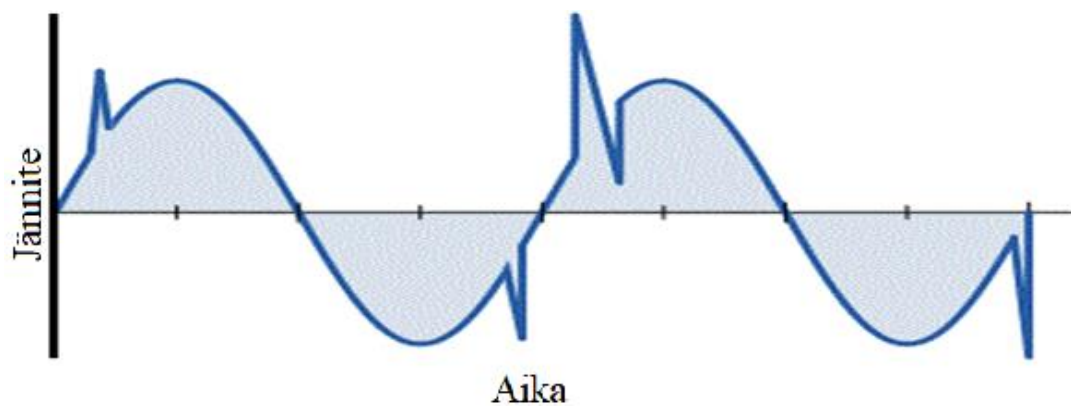
**Kuva 6. Jännitekatko**

Suurin osa jännitekatkoista johtuu lyhyistä ohimenevistä vioista. Yleisesti vikojen poistamiseen käytetään pikajälleenkytkentää (PJK) sekä aikajälleenkytkentää (AJK). Pikajälleenkytkentä on yleisesti ensimmäinen toimenpide vian poistamiseksi. Mahdollisia vikoja voi olla esimerkiksi oksa, eläin tai salaman aiheuttama valokaari. Tällöin vika pyritään

sammuttamaan lyhyellä, n. 0.7 s katkolla. Aikajälleenkytkentää käytetään minuutin kuluessa pikajälleenkytkennästä, mikäli vika on edelleen havaittavissa. Suurin osa ilmajohdoverkon vioista (~90 %) saadaan poistettua PJK:n tai AJK:n avulla [4, 17].

### 2.1.4 Transientit

Transienttiylijännitteet jaotellaan niiden keston perusteella pitkiin (yli 100  $\mu$ s), keskipitkiin (1-100  $\mu$ s) ja lyhyisiin (alle 1  $\mu$ s). Pitkät transientit voivat aiheutua mm. sulakkeen palamisesta tai kompensointilaitteiston kytkemisestä. Keskipitkät transientit voivat aiheutua mm. katkaisijat toiminnasta tai linjaan osuneesta salamasta [18]. Kuvassa 7 on esitetty transienttijännitteen aiheuttama käyrämuoto. Lyhyet transientit aiheutuvat paikallisten kuormien kytkennästä.



*Kuva 7. Transienttiylijännite [19]*

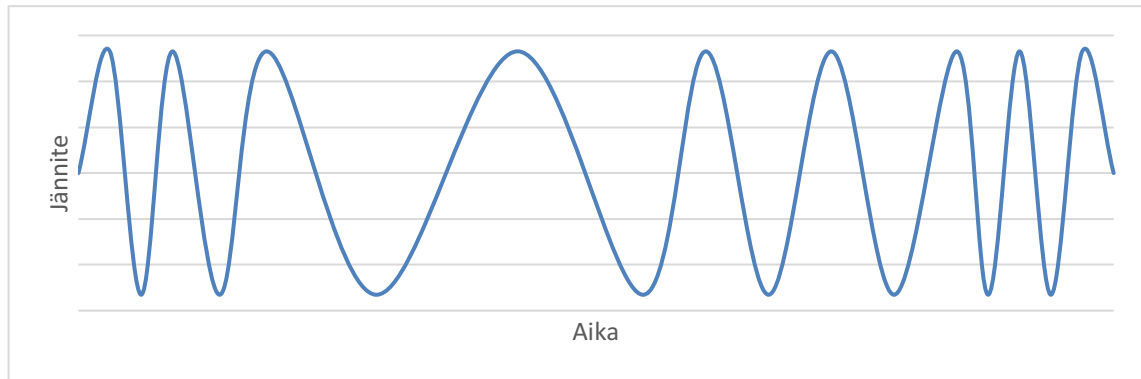
Ne voivat myös johtua luonnon ilmiöistä, kuten ukonilmasta. Salama voi indusoida linjaan jännitettä, jolloin jännitetaso kasvaa. Transientteja aiheuttaa myös eristeen tai eristimen läpilyönti. Transientit voivat olla erittäin haitallisia esimerkiksi tietokoneille. Transientit saattavat käynnistää laitteita itsestään ja vahingoittaa niitä. Ne voivat myös tuhota tiedostoja [9, 20].

### 2.1.5 Taajuuden vaihtelu

Suomessa verkkojännitteen nimellistaajuuden tulee olla 50 Hz. Yhteiskäyttöverkoissa taajuuden tulee olla 50 Hz  $\pm$  1% 99,5 % vuodesta ja 50 Hz + 4 % / -6 % 100 % ajasta. Erillisverkoissa taajuuden tulee olla 50 Hz  $\pm$  2% 95% viikosta ja 50 Hz  $\pm$  15 % 100 % ajasta [8, 18].

Verkkojännitteen taajuus vaihtelee jatkuvasti, mutta standardin rajojen ylityksiä esiintyy erittäin harvoin. Niitä voi kuitenkin esiintyä mm. pienillä jakelualueilla, kuten saarilla ja varavoimakonekäytöissä. Taajuuspoikkeaman jännitteen käyrämuoto on esitetty seuraavalla sivulla olevassa kuvassa 8.





**Kuva 8. Taajuuden vaihtelu**

Taajuuden vaihtelut johtuvat yleensä nopeista kuormituksen muutoksista yksittäisillä generaattoreilla, esimerkiksi saarekekäytössä [20]. Poikkeamia voi myös aiheutua, kun verkkoon tuotetun pätötehon määrä poikkeaa kulutetun pätötehon määrästä.

### 2.1.6 Välkynnän häiritsevyysindeksi

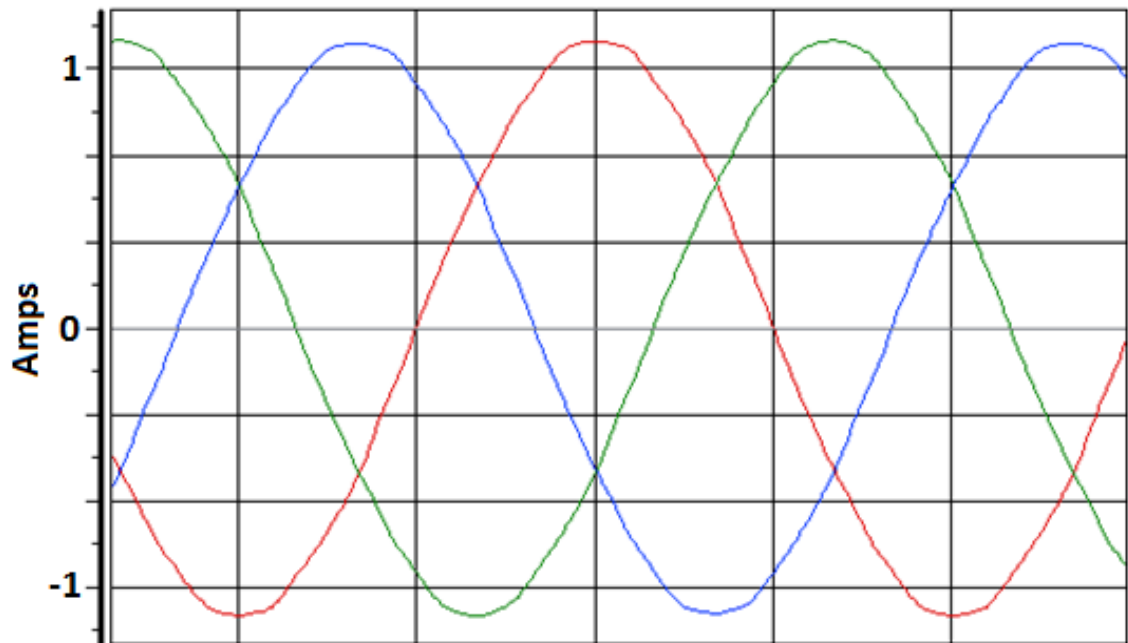
Standardin SFS-EN 50160 mukaan, normaaleissa käyttöolosuhteissa, minkä tahansa viikon pituisen mittausjakson aikana, jännitteen vaihtelun aiheuttaman välkynnän pitkäaikaisen häiritsevyysindeksin ( $P_{lt}$ ) tulisi olla 95 % ajasta pienempi tai yhtä suuri kuin 1. Välkyntä on valonlähteen luminanssin tai spektrijakautuman muutosten aiheuttama näköaistimuksen ajallinen vaihtelu. Välkyntään reagoiminen on subjektiivista ja voi vaihdella välkynnän aiheuttajan ja keston mukaan. Joissain tapauksissa  $P_{lt} = 1$  voi olla ärsyttävää, kun taas toisissa tapauksissa suurempia  $P_{lt}$  arvoja on havaittu ilman haittavaikutuksia [8].

Välkyntää mitataan tällä hetkellä UIE-IEC:n määrittelemällä menetelmällä, joka perustuu jännitteen vaihtelun mittaamiseen. Standardeissa ei ole esitetty välkynnän mittausmenetelmiä, joissa valonlähteen valontuoton modulointia huomioitaisiin. Välkynnän mittaus nykyisellä menetelmällä ei sovellu led-valaisimien välkynnän mittaamiseen. Led-valaistuksen kohdalla, välkyntää tulisi mitata fotometrisesti. Yli 100 Hz välkyntä on näkymättömiä, mutta voi kuitenkin häiritä epäsuorasti, kuten aiheuttaa stroboskooppisia näköaistimuksia, kuten jatkuvan liikkeen havainnointia diskreettien kuvien sarjana [21, 22].

### 2.1.7 Jakelujännitteen epäsymmetria ja kuormituksen epäbalanssi

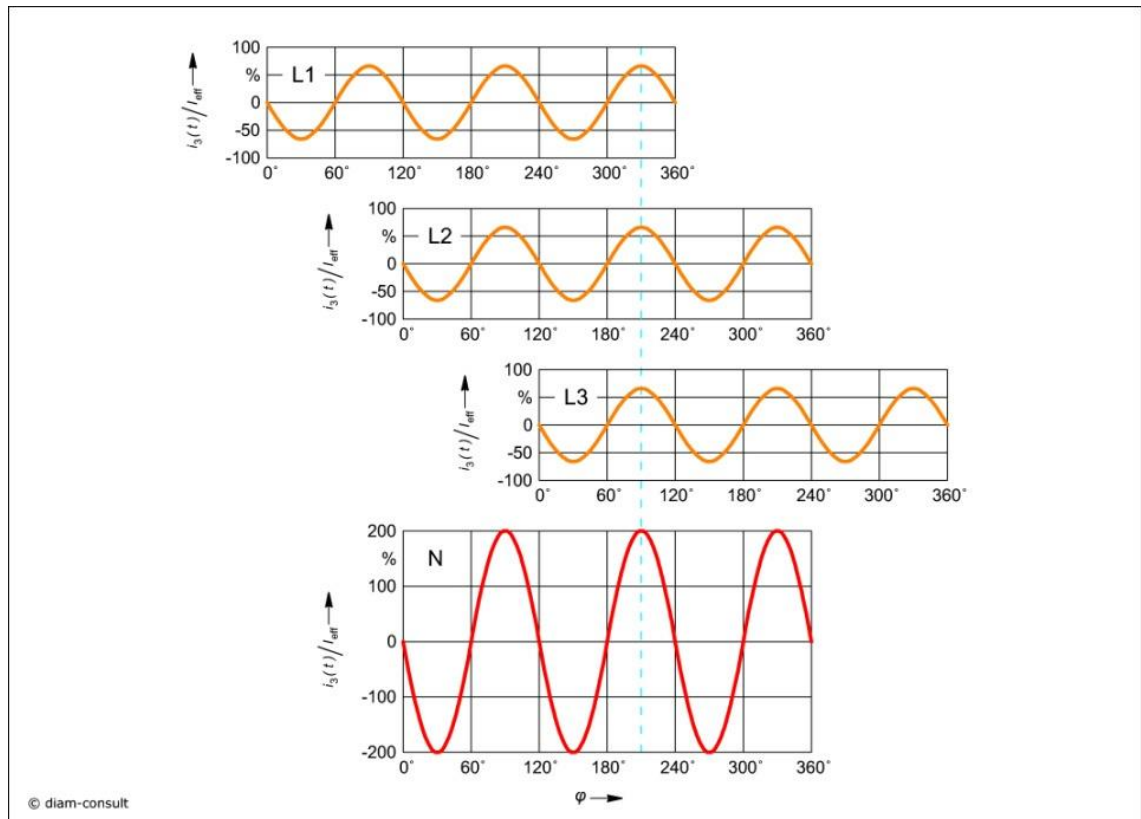
Normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana, jokaisen jakelujännitteen (perustaajuisen) vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista 95 % tulee olla välillä 0...2 % (perustaajuisesta) myötäkomponentista [8].

Kun alla olevassa kuvassa 9 olevan kolmivaiheisen lähdön jokaisen vaiheen virran hetkellisarvo summataan, päädytään aina arvoon 0. Ideaalinen verkko ei kuitenkaan käytännössä toteudu, sillä verkkoon on kytkettynä paljon vaihesiirtoa aiheuttavia induktiivisia tai kapasitiivisia kuormia sekä epälineaarisia kuormituksia. Sähkön laatuun suurimmat vaikuttavat tekijät ovat koko ajan kasvamassa olevat epälineaariset kuormatyypit, kuten taajuusmuuttajat ja hakkuriteholähteet, tietokoneet sekä yhtenä isona tekijänä nopeasti yleistynyt led-valaistus [21].



**Kuva 9. Symmetrinen kolmivaiheinen lähtö**

Epäsymmetrisessä kuormituksessa nollajohtimessa kuitenkin kulkee virtaa. Epäsymmetrian syynä on yleensä yksivaiheiset viat, moottorin vinokuormitus tai yksivaiheinen kuormitus. Kun kuormituksen tyyppi on epälineaarinen kuormitus, kuten led-valaistus, summautuu kolmella jaolliset parittomat yliaallot nollajohtimessa. Kuvassa 10 on esitetty kolmannen yliaallon summautuminen nollajohtimessa.



**Kuva 10. Kolmannen yliaallon summautuminen nollajohtimessa [23]**

Kolmella jaolliset parittomat yliaallot ovat saman vaiheiset jokaisessa vaihejohtimessa, minkä seurauksena yliaaltovirta summautuu ja näkyy nollajohtimessa. Yliaaltojen vaikutuksesta nollavirta voi kasvaa huomattavankin suureksi, jopa 1.7 kertaiseksi vaihevirtaan nähden.

### 2.1.8 Loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus

Kun verkossa siirretään loistehoa, se kasvattaa muuntajien ja johtojen tehohäviöitä sekä pienentää verkon pätötehon siirtokykyä. Verkonkäyttäjälle loistehosta aiheutuu kustannuksia, mikäli sen tarve ylittää jakeluverkkoyhtiön asettaman ilmaisen loistehon siirtokapasiteetin tai kun virran arvo kasvattaa sulakekokoa, jolloin liittymismaksu ja perusmaksu kasvavat. Tällöin käyttäjän kannattaa tuottaa tarvitsemansa loisteho paikallisesti itse.

Vaadittu loisteho voidaan tuottaa kondensaattoreilla, kun oletetaan, että kuormitus on induktiivinen. Kapasitiivisessa kuormituksessa loistehoa kompensoidaan reaktorilla. Kuitenkin, kun kondensaattori kytketään verkkoon, muodostaa se verkon induktanssin kanssa rinnakkaisresonanssipiirin. Rinnakkaisresonanssipiirissä yliaaltovirrat vahvistuvat. Kun kytkentää tarkastellaan muuntajan ensiöpuolelta, muuntajan induktanssi ja kondensaattorin kapasitanssi muodostavat sarjaresonanssipiirin. Mikäli muuntajan ensiöpuolella, keskijänniteverkossa esiintyy jännitesäröä, jonka taajuus on lähellä sarjaresonanssipiiriä, kulkee tämä virta muuntajan kautta kondensaattoriin. Tämä puolestaan aiheuttaa säröä

pienjänniteverkon jännitteeseen. Kondensaattorin ja verkon induktanssin välinen rinnakkaisresonanssitaajuus voidaan laskea yhtälön (3) mukaan.

$$f_r = \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \cdot f_n \quad (3)$$

Yhtälössä  $S_k$  on verkon oikosulkuteho (kVA),  $Q_c$  on kompensointilaitteiston teho (kVAr) ja  $f_n$  on verkon taajuus (Hz).

Jakeluverkoissa epälineaaristen kuormien nopea kasvu aiheuttaa ongelmia, sillä ne ottavat verkosta epäsinimäistä virtaa. Verkon impedanssista johtuen, syntyy perustaajuudesta poikkeavia jännitteitä, jotka näkyvät jännitteen käyrämuodossa jännitesärönä. Säröytynyt jännite taas aiheuttaa epälineaarisia virtoja jopa lineaarisissa kuormissa. Loistehon kompensointilaitteisto tulisi aina valita vallitsevan yliaaltotilanteen mukaan. Mikäli verkossa olevat epälineaariset kuormitukset kasvavat, tulisi kompensoinnin sopivuus tarkistaa, jotta vältetään mahdollisilta resonanssitilanteilta. Yleisesti käytettyjä kompensointilaitteistoja ovat estokelaparisto, yliaaltosuodin sekä aktiivisuotimet.

Estokelaparistossa on kondensaattorin kanssa sarjassa kela, jolloin voidaan välttää mahdolliset haitalliset resonanssitilanteet kondensaattorin kapasitanssin ja verkon induktanssin välillä. Estokelapariston viritystaajuuden valinnalla voidaan vaikuttaa sen ominaisuuteen suodattaa yliaaltoja. Estokelapariston toimintaperiaate perustuu sen impedanssikäyttäytymiseen. Viritystaajuuden alapuolella paristo näkyy kapasitanssina, jolloin se tuottaa loistehoa ja viritystaajuuden yläpuolella se näkyy induktanssina, jolloin se ei vahvista yliaaltoja. Pelkkä kondensaattori vahvistaisi yliaaltovirtoja, jotka ovat lähellä verkon ja kondensaattorin rinnakkaisresonanssia moninkertaiseksi [13, 24].

Yliaaltosuodatinta tarvitaan verkoissa, joissa on suuri yliaaltopitoisuus. Yliaaltosuodatin on kuten estokelaparisto, mutta sarjaresonanssitaajuus valitaan verkossa esiintyvien haitallisten yliaaltojen mukaan niin, että suodatin toimii ns. imupiirinä. Jokainen suodatettava yliaalto vaatii oman suodattimen, joka on viritetty yliaallon taajuudelle. Lisäksi yliaaltosuodin toimii kompensoinnissa, kun sen tuottama loisteho mitoitetaan verkon loistehotarpeen mukaan. Yliaaltosuodatinta ei kuitenkaan voida käyttää suodattamaan kolmatta (150Hz) yliaaltoa. Tämä johtuu siitä, että kolmivaihejärjestelmässä kolmella jaolliset (joista 3. merkittävin) summautuvat nollajohtimessa. Nollajohtimen yliaaltovirran määrään voidaan vaikuttaa mm. ns. THF-suotimella, joka on nollajohtimeen asetettu rinnakkaisresonanssipiiri [24].

Aktiivisuotimet ovat puolijohteilla toteutettuja yliaaltosuotimia. Aktiivisuotimissa voidaan valita useita suodatettavia taajuuksia, toteuttaa suodatus ilman loistehon tuotantoa sekä välttää rinnakkaisresonanssivaara.

Vaihe-ero voidaan suoraan nähdä osoitinympeyrästä ja sitä merkitään tunnuksella  $\varphi$ . Suure  $\cos\varphi$  on tehokerroin. Tehokerroin (PF) pyritään saamaan mahdollisimman lähelle ykköstä. Tehokerroin voidaan myös yhtälön (4) mukaan.

$$PF = \cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (4)$$

Yhtälössä (4) P tarkoittaa pätötehoa ja S näennäistehoa. Kuitenkin, jos kyseessä on epälineaarinen kuormitus, kuten led-valaistus, todellinen tehokerroin (True Power Factor, TPF) pitää laskea niin, että harmoniset komponentit otetaan myös laskennassa huomioon. Tehokertoimessa huomioidaan vain perustaajuus. TPF lasketaan kertomalla normaali tehokerroin häiriöiden tehokertoimella (Distortion Power Factor, DPF). [25]. DPF voidaan laskea yhtälön (5) avulla.

$$\frac{1}{\sqrt{THD^2}} = \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}} \quad (5)$$

Yhtälössä (5)  $I_{1,rms}$  tarkoittaa perustaajuisen virran tehollisarvoa ja  $I_{rms}$  kokonaisvirran tehollisarvoa. Häiriöiden tehokerroin on siis perustaajuisen virran tehollisarvon suhde kokonaisvirran tehollisarvoon.

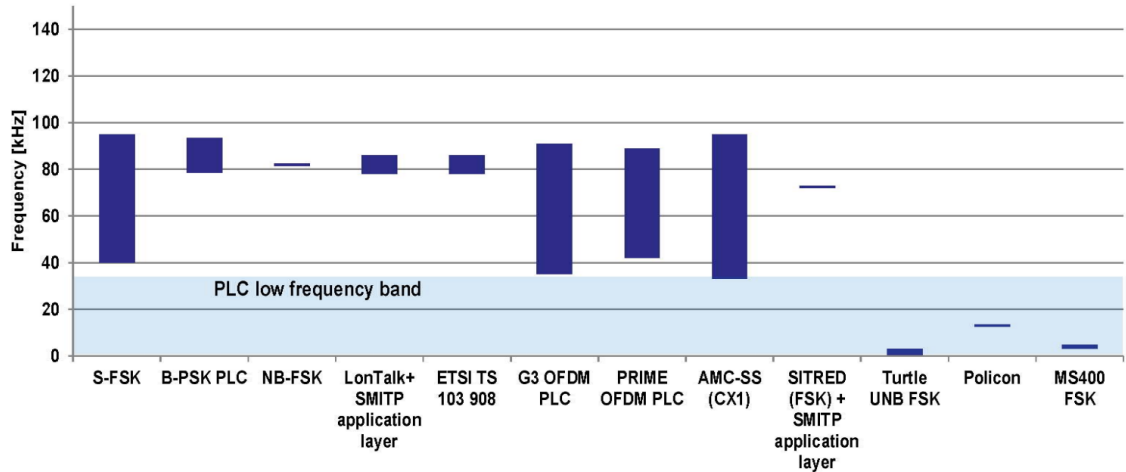
### 2.1.9 Supraharmoniset

Viime aikoina on maailmanlaajuisesti alettu huomioimaan tarkemmin matalalla jännite-tasolla toimivien laitteiden, kuten led-lamppujen aiheuttamat häiriöt. Taajuusaluetta 2 kHz-150 kHz kutsutaan supraharmoniseksi alueeksi. Kyseistä taajuusaluetta tutkitaan nyt erityisesti siitä syystä, että taajuusalueelle ei ole olemassa teknisiä standardeja, koskien häiriöiden amplitudeja sekä taajuuksia. Standardissa EN-50160 otetaan kantaa harmonisiin yliaaltoihin, mutta standardin ylärajana on 2 kHz. EMC-standardit taas käsittelevät taajuusalueita 150 kHz ylöspäin aina 2.5 kHz asti [26].

Supraharmonisia syntyy varsinkin led-lampuissa, joissa käytetään hakkuriteholähteitä. Teholähteissä käytetään yleisesti kytkentätaajuutena 2-150 kHz. Häiriöitä verkkoon syntyy kytkentätaajuudella ja tämän monikerroilla. Nämä voivat aiheuttaa virhetoimintaa sähköverkkotiedonsiirrossa. Led-lamppujen on myös raportoitu aiheuttavan välkyntää sekä ennenaikaista rikkoutumista supraharmonisten häiriöiden johdosta [27].

Sähköverkkotiedonsiirtoa (PLC) käytetään sähkömittareiden etäluennassa (AMR). Etäluennalla voidaan lukea käyttäjien energiankulutuksia, mutta tulevaisuudessa mahdollisesti myös esimerkiksi verkon käyttötoiminnan ja suunnittelun tueksi saadaan dataa. Verkon reaaliaikainen kuormitustieto mahdollistaa myös kuormien ohjauksen. Seuraavassa kuvassa 11 on esitelty erilaisten PLC-protokollien käyttämiä taajuusalueita.

Teollisuuden moottorikäyttöjen ja kotitalouslaitteiden korkeat hyötysuhdevaatimukset sekä hajautettu tuotanto on tuonut epälineaarisia tehoelektroniikkalaitteita räjähdysmäisesti verkkoon. Näiden laitteiden on raportoitu häiritsevän PLC-laitteiden toimintaa. Tämän seurauksena IEC standardoinnissa pyritään tuomaan häiriöpäästörajoituksia myös 2-150kHz taajuusalueelle [28].



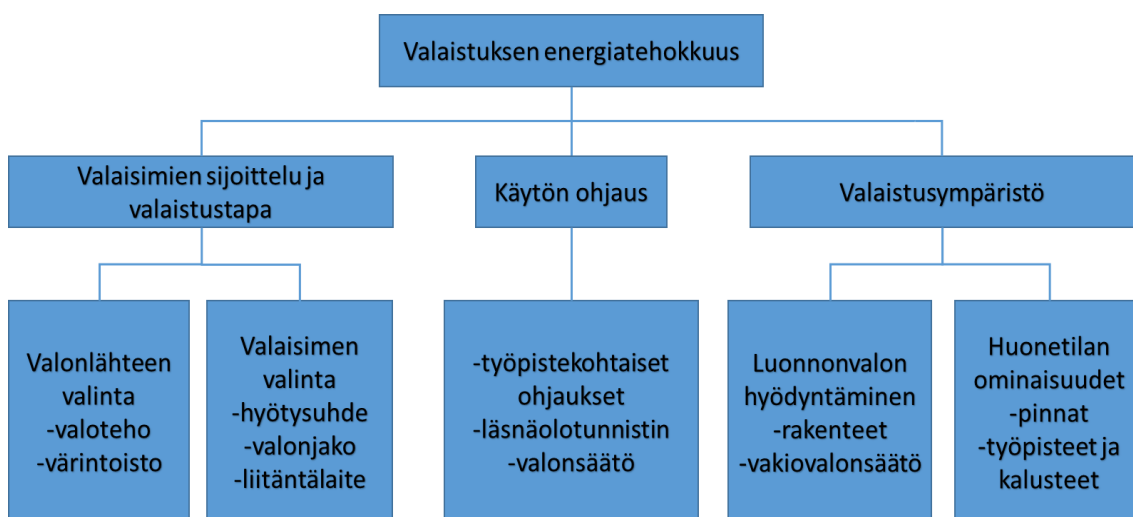
**Kuva 11. PLC-järjestelmien käyttämät taajuuskaistat [28]**

Ongelmia pyritään vähentämään ensinnäkin parantamalla PLC-laitteiden toimintaa häiriöisessä sähköverkkoympäristössä, mutta myös tuomalla uusia rajoitteita matalammille taajuusalueille. Nämä voivat tarkoittaa esimerkiksi kaventamalla käytettävissä olevaa taajuusaluetta laitteiden kytkentätaajuudelle ja varaamalla taajuusalue PLC-yhteyksien käyttöön. Hyötysuhdevaatimuksia pyritään tehokertoimenkorjauspiireillä (PFC). Yleisesti käytetty PFC-piiri hakkuriteholähteen diodisillan perään kytketty boost-hakkuri. Tällä pyritään saamaan verkkovirta sinimuotoiseksi ja samaan vaiheeseen jännitteen kanssa. PFC-piirit korjaavat tehokerrointa, mutta lisäävät laitteen tuottamia supraharmoonisia yliaaltoja. Elektronisten liitännälaitteiden koko pyritään minimoimaan, jolloin kytkentätaajuutta kasvatetaan [27].

### 3. VALAISTUKSEEN LIITTYVÄT TUNNUSLUVUT

Yhteiseurooppalaiset valaistussuositukset on esitetty standardissa EN 12464-1. Työtuvalisuuslain mukaan työpisteellä tulee olla riittävä, työtehtävän edellyttämä valaistus. Eri-tyyppisille työtehtäville on laadittu valaistusvaatimukset standardissa EN 12464-1. Valaistuksen riittävyysvaatimukset on myös kirjattu lakiin, joka tekee edellä mainitusta standardista velvoittavan. Osa vaatimuksista sekä yksityiskohdista on jätetty kuitenkin avoimiksi, joten niistä voidaan sopia kansallisella tasolla. Standardissa on määritelty mm. työalueen ja välittömän läheisyyden valaistusvoimakkuudet, tilan yleisvalaistuksen valaistusvoimakkuus, häikäisyn taso, valon tasaisuus, valaistuksen alenemakerroin, välkyntä sekä värintoistovaatimukset [29].

Valaistuksen energiatehokkuuteen sekä valaistuksen laatuun vaikuttavat valittu valaisin-tyyppi sekä valaistuksen käyttö. Alla olevassa kuvassa 12 on esitetty energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät.



**Kuva 12. Energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä [30, muokattu]**

Valaistuksen energiatehokkuus saadaan maksimoitua, kun huomioidaan kuvassa 12 esitellyt asiat. Valaisimen toteutus tulee olla laadukas, valinnassa on syytä varmistua, että valaisin on tilaan sopiva eli valonjako ja optiikka on optimoitu käyttöympäristöön. Valaistus on suunniteltu ammattitaidolla ja suunnittelussakin on jo otettu huomioon valaistuksen ohjaus. Pitkikäiseen ja energiatehokkaaseen valaistukseen voidaan päästä vain huolellisella huolto- ja kunnossapitosuunnitelmalla.

### 3.1 Valovirta

Valovirta ilmaisee valonlähteen tuottaman näkyvän valon säteilytehon ja sitä kuvataan tunnuksella  $\Phi$ . Valovirtaa kuvataan yksiköllä lumen (lm). Lumen-arvo kertoo kuinka paljon ihmissilmälle näkyvää valoa valonlähde tuottaa. Led-valaisimissa tulee ilmoittaa valovirta, jotta osataan valita vanhan valaistuksen tilalle sopiva valaisin. Muissa kuin led-valaisimissa valovirran ilmoittaminen ei ole yleistä vaan yleisesti esimerkiksi halogeenivalaisimissa ilmoitetaan vain teho. Arvo voidaan kuitenkin laskea kertomalla lampun käyttöhyötysuhde valovirralla (LOR-luku).

Ihmisen havaitsema valovirran määrä riippuu säteilyn aallonpituudesta. Silmä on herkimillään 555 nm aallonpituudella. Yhden watin säteily tällä aallonpituudella saa aikaan 683 lm suuruisen valovirran. Valovirran spektritiheys  $\Phi_\lambda$  voidaan laskea yhtälön (6) mukaan.

$$\Phi_\lambda = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_{e,\lambda} \quad (6)$$

Yhtälössä  $K_m$  on vakiokerroin 683 lm/W ja  $V(\lambda)$  on silmänherkkyysluku. Spektritiheyden yksikkö on W/nm ja sen avulla voidaan laskea valovirta [31, 32].

### 3.2 Valaistusvoimakkuus

Valaistusvoimakkuutta kuvataan tunnuksella  $E$  ja sen yksikkö on luxi (lx). Valaistusvoimakkuudella kuvataan valaistusjärjestelmän suorituskykyä, eli tulevan valon määrää tietylle pinnalle eli lumen neliömetriä kohden (lm/m<sup>2</sup>). Valaistusvoimakkuus voidaan laskea yhtälön (7) mukaan.

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (7)$$

Yhtälössä  $\Phi$  on valovirta ja  $A$  on pinta-ala. Sisävalaistuksessa voimakkuuden suuruusluokka on yleensä 100 ja 1000 luksin välillä. Suoran auringonpaisteen valovoimakkuus on luokkaa 100 000 lx [33].

### 3.3 Valotehokkuus

Valotehokkuudella tarkoitetaan tuotetun valovirran suhdetta valonlähteen kuluttamaan sähkötehoon (lm/W) ja voidaan laskea yhtälön (8) mukaan.

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \quad (8)$$

Suureella kuvataan, kuinka hyvin käytetty sähkövirta muuttuu valovirraksi. Valotehokkuutta voidaan pitää valonlähteen hyötysuhteena. Halogeenilampulla valotehokkuus on n. 15-25 lm/W, loistelampulla n. 25-100 lm/W ja led-lampulla n. 150-250 lm/W [33].



### 3.4 Ekvivalentti värilämpötila

Ekvivalentilla värilämpötilalla tarkoitetaan valon värivaikutelmaa. Esimerkiksi valkoinen valo tehdään eri värien aallonpituuksien sekoituksella, jolloin valon spektri määrää valon väriominaisuudet. Kun valossa punainen aallonpituus on vallitseva, väri näyttää lämpimämmältä. Kun valossa sinisen värin aallonpituus on vallitseva, valo näyttää kylmemmältä. Värilämpötiloja kuvataan yksiköllä kelvin (K). Värivaikutelma on helpoin ymmärtää esimerkiksi hehkulampun hehkulangan avulla. Jos lanka kuumennetaan esimerkiksi 2700 kelviniin, mikä on yleinen kotivalaistukseen tarkoitetun lampun värilämpötila, valo näyttää kellertävän/punertavan valkoiselta. 4000 kelvinissä valo on lähellä auringonvaloa ja tästä korkeammissa, esim. 6000 kelvinin lämpötilassa sinertävän valkoinen. Suuremmissa lämpötiloissa valo alkaa taittaa jo violettiiin. Valon värilämpötila voidaan määrittää tarkasti vain hehkuvaan tekniikkaan perustuvilla valaisimilla. Muilla valaisintyypeillä värilämpötilaa kuvataan ekvivalenttisella värilämpötilalla [34].

### 3.5 Värintoistoindeksi

Värintoistoindeksiä kuvataan termillä  $R_a$ . Vaikka valonlähteiden värivaikutelma vaikuttaa silmämääräisesti samalta, se ei kuitenkaan takaa, että väripinnat näyttäisivät samanvärisiltä molemmilla valonlähteillä. Esimerkiksi kaksi silmämääräisesti saman sävyistä valkoiselta vaikuttavaa valoa saattavat olla spektriltään hyvin erilaisia. Valkoista lediä ei ole olemassa, vaan valo tuotetaan erilaisilla aallonpituusyhdistelmillä. Materiaali ei välttämättä heijasta valaisimen tuottamia aallonpituuksia, jolloin pinnan värivaikutelma voi olla hyvinkin erilainen erilaisilla valaisimilla [33].

Uuden led-teknologian spektri on hyvin kapea, jolloin värintoistoindeksi ei kuvaa ledin värivaikutelmaa välttämättä oikein. Kansainvälinen valaistuskomissio (CIE) on kehittämässä mittausmenetelmiä ja määritelmiä ledien värintoistoindeksin yhdenvertaistamiseksi muiden valaistusratkaisujen kanssa, jotta ne olisivat vertailukelpoisia. Alla olevassa taulukossa 2 on esitetty värintoistoindeksin arvoasteikko.

**Taulukko 2. Värintoistoindeksin arvoasteikko [34]**

Koodi	$R_a$	Värintoisto
6	57-66	Huono
7	67-76	Kohtalainen
8	77-86	Hyvä
9	87-100	Erinomainen

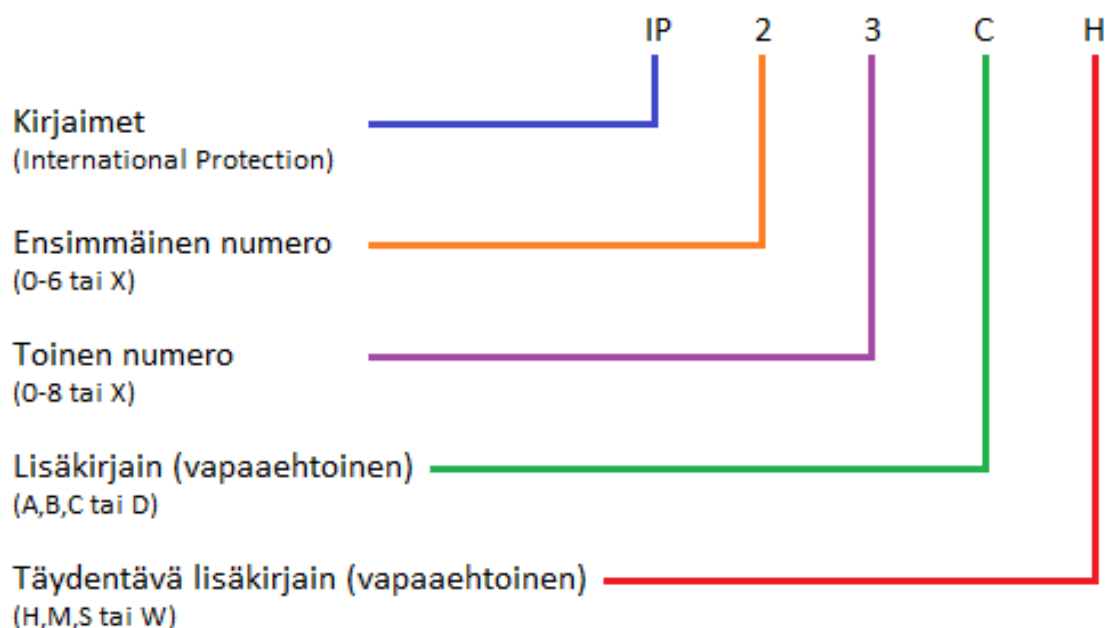
Värintoistoindeksin tulisi olla vähintään 80 kaikissa tiloissa, joissa työskennellään tai oleskellaan toistuvasti [29].

### 3.6 Elinikä

Perinteisillä termisesti säteilevillä valaisimilla elinikä odote on melko lyhyt ja käytännössä tarkoittaa hehkulangan poikkipalamista. Loistesäteilijöillä eliniän odote on n. 10 kertainen termisiin säteilijöihin verrattuna. Koska led-valaisimien käyttöikä on tyypillisesti erittäin pitkä, valovirran käyttöajan mittaan tapahtuvan alenemisen mittaaminen on hyvin pitkä prosessi. Ledien ilmoitettu käyttöikämerkintä, esimerkiksi  $L_{70}$  tarkoittaa, että ilmoitetun käyttöajan jälkeen valaisin tuottaa vielä 70 % alkuperäisestä valovirrasta. Näitä arvoja käytetään valaistusta suunniteltaessa. Tämä ei kuitenkaan ennusta lampun elinikää, vaan kertoo sen kyvystä säilyttää valovirran arvonsa. Yleisesti tämä määritellään niin, että elinikä on se aika, jonka jälkeen valaisimen valovirta on 70 % alkuperäisestä valovirrasta. Eliniän odote on moninkertainen loistesäteilijöihin verrattuna. Led-lamppujen elinikää rajoittaa käytettyjen materiaalien vanheneminen sekä elektronisten komponenttien vikaantuminen [34].

### 3.7 Suojausluokka

Sähkölaitteiden kotelointiluokituksessa käytetään kansainvälistä International Protection-luokitusta (IP). IP-luokituksen sisältö on esitetty standardissa SFS-EN 60529. Kotelointiluokka tulee vastata sähkölaitteen käyttöympäristössä vallitsevan tilan vaatimuksia. IP-koodin muodostaminen tapahtuu alla olevan kuvan 13 mukaisesti.



**Kuva 13. IP-koodin muodostaminen [35]**

Ensimmäinen numero määrittää laitteen vaarallisten osien kosketussuojauksen sekä suojauksen pölyltä ja vierailta esineiltä. Ensimmäisessä numerossa 0 tarkoittaa, että laitteessa ei ole suojausta ja 6 tarkoittaa, että laitteessa on täydellinen suojaus ja se on pölytiivis. Tunnukseen merkitään vain korkein numero, sillä tällöin se täyttää myös alempien luokituksien vaatimat ominaisuudet.

Toinen numero kuvaa laitteen kotelon kykyä estää veden haitallisen sisääntunkeutumisen. Toisen numeron 0 tarkoittaa, että laite ei ole suojattu vedeltä ja numero 6, että se on suojattu joka suunnasta tulevalta vesisuihkulta ja numero 8, että se kestää jatkuvan veteen upotuksen. Toinen numero numeroon 6 asti merkitsee, että se täyttää myös alempien luokkien vaatimukset. IP-luokitus, jossa on pelkästään toinen numero ja tämä numero on 7 tai 8 (esim. IPX7), ei tarkoita, että laite on suojattu suoralta vesisuihkulta.

Kotelointiluokan lisäkirjain A tarkoittaa, että vaaralliset osat on kosketussuojattu nyrkiltä ja D langalta. Täydentävä lisäkirjain ilmaisee poikkeuksellisesta ominaisuudesta. Esimerkiksi kirjain M tarkoittaa, että laitteen vesisuojaus on koetestattu laitteen ollessa käynnissä. Täydentävä kirjain W tarkoittaa, että laite on testattu erityisiin sääolosuhteisiin [35].

Karkeasti IP-luokituksesta nähdään, mihin käyttöön valaisin on tarkoitettu. IP20-luokituksella merkittyä valaisinta voidaan käyttää sisätiloissa. Laitteessa on kosketussuojattu, mutta siinä ei ole suojausta vedeltä. IP44-luokituksella olevia valaisimia voidaan käyttää kosteissa tiloissa, kuten kylpyhuoneissa. Tämä luokitus ei takaa vedenpitävyyttä, mutta laitteessa on kuitenkin suojaus roiskeilta. Ulkovalaistuksessa suojausvaatimus riippuu valaisimen asennustavasta. Ulkovalaistuksessa vaaditaan yleensä IP54 tai 55, mutta heikommallakin suojauksella varustettuja valaisimia voidaan käyttää, mikäli valaisin ei missään tilanteessa altistu suoralle vesisuihkulle. IP67-luokituksellisessa valaisimessa on sekä pöly- että vesitiivis rakenne. Laite on myös vesitiivis 1m syvyydessä vähintään 30min [36].

### 3.8 Fotometrinen koodi

Valaisimen tärkeimmät laatuparametrit ilmoitetaan kuusinumeroisella fotometrisellä koodilla. Koodista voidaan lukea värintoistoindeksi, ekvivalentti värilämpötila, värikoordinaatit sekä valovirran pysyvyys. Seuraavassa taulukossa 3 on esitetty fotometrisen koodin tulkinta.

***Taulukko 3. Esimerkkitulkinna fotometrisestä koodista [34]***

Koodi 740/357	Selitys
7	Värintoistoindeksin alkuarvo ( $\geq 70$ )
40	Ekvivalentin värilämpötilan alkuarvo 4000 K
3	Värikoordinaattien alkuhajonta 3-portaisessa MacAdamin ellipsissä
5	Värikoordinaattien loppuhajonta 5-portaisessa MacAdamin ellipsissä
7	Valovirran pysyvyys testiajan lopulla ( $\geq 70$ )

## 4. TYYPILLISIMMÄT VALAISTUSTEKNIIKAT

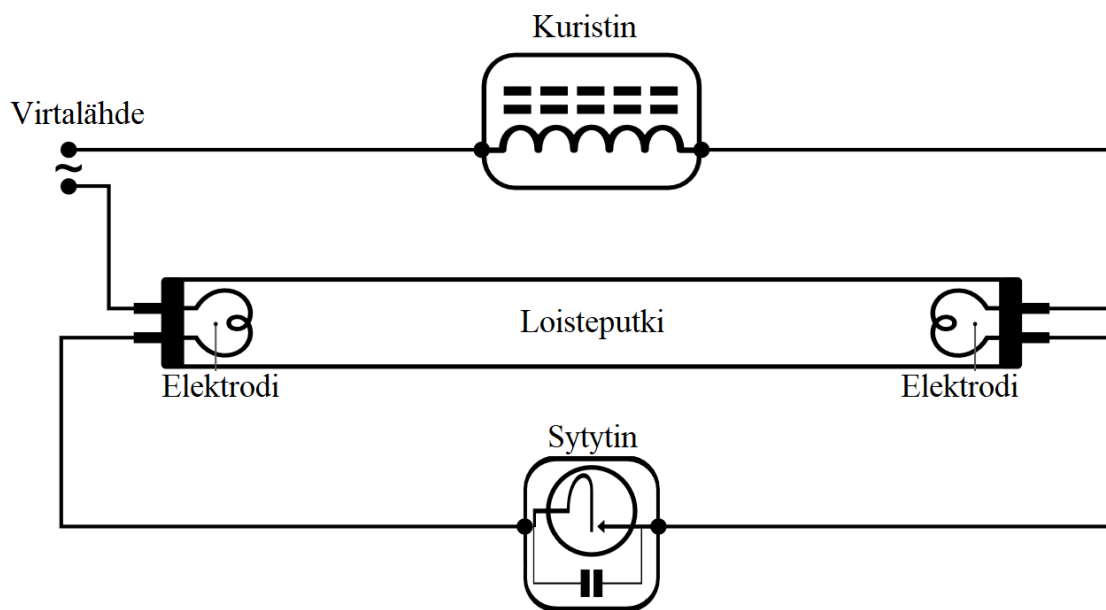
Valaisin- ja valonlähdeala on tällä hetkellä voimakkaassa murroksessa ja valaisinjärjestelmät muuttuvat koko ajan voimakkaasti. Valaistuksen sähkönkulutus on n. 20-25 % maailmanlaajuisesta kokonaisenergiankulutuksesta. Tämän johdosta valaistuksen energiatehokkuus on erittäin tärkeä. Teknologiaa on pyritty kehittämään koko ajan energiatehokkaampiin ratkaisuihin.

EU-direktiivin johdosta kaikki yli 7W hehkulamput poistuivat markkinoilta 2012 syksyllä [37]. Myös loistevalaisimien ferromagneettiset liitäntälaitteet ovat olleet kiellettyjä myydä kevään 2017 jälkeen [38]. Tämän seurauksena uudet valaisintekniikat kehittyivät ja yleistyvät koko ajan. Säännösten myötä vanhat valaisinratkaisut korvautuvat esimerkiksi pienloistelampuilla tai ledeillä. Molemmilla valaistusratkaisuilla on hehkulamppuun verrattuna uusia ominaisuuksia sähköverkon kannalta. Näillä ominaisuuksilla saat-  
taa olla tulevaisuudessa vaikutusta sähköverkon suunnitteluun sekä käyttöön.

Valaistuksen tehtävä on tuottaa riittävästi, riittävän hyvää valoa käyttökohteen tarpeen mukaan. Energiatehokkaassa valaistuksessa pyritään mahdollisimman pieneen sähkönkulutukseen sopivan valaistuksen tuottamiseksi. Tässä kappaleessa perehdytään tällä hetkellä yleisimmin käytössä oleviin valaisintyyppeihin.

### 4.1 Loistelamppu

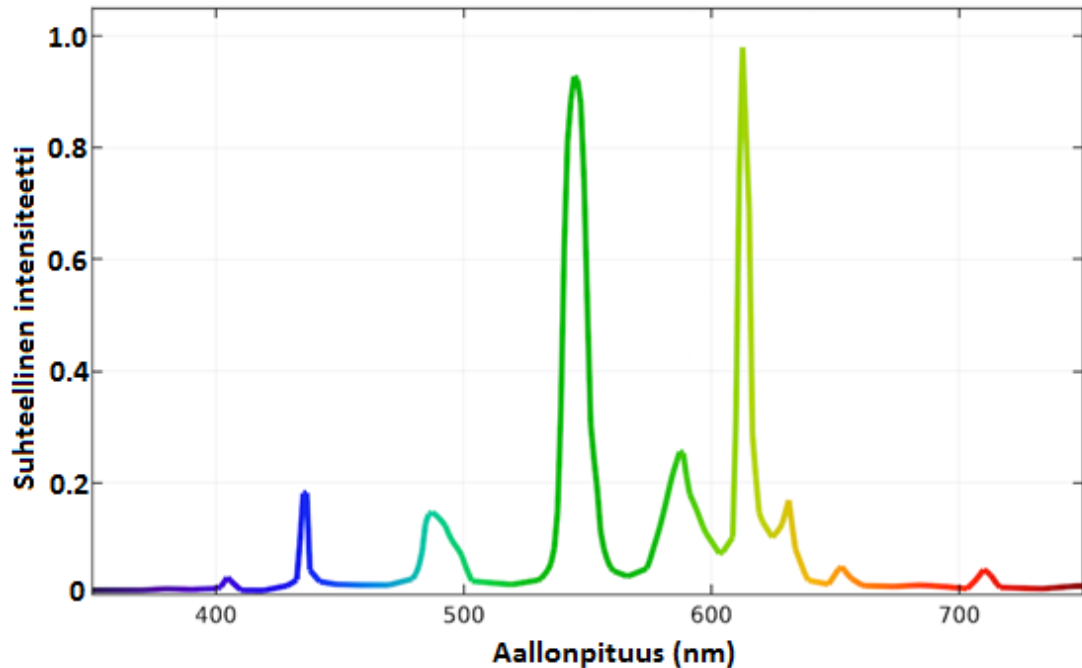
Yleisimmin käytössä oleva loistelamppu on loisteputki. Loisteputkia käytetään hyvin yleisesti julkisissa rakennuksissa. Loistelamppu vaatii toimiakseen sytyttimen sekä virtaa rajoittavan kuristimen. Lisäksi monissa lampuissa on kompensointi -sekä häiriönpoistokondensaattorit. Virtaa rajoittavana kuristimena on aiemmin käytetty magneettista kuristinta, mutta uudemmissa valaisimissa nämä on korvattu elektronisella liitäntälaitteella. Liitäntälaite sisältää myös sytyttimen. Kaikki sähköiset komponentit on yleensä sijoitettu valaisimen rakenteeseen. Seuraavassa kuvassa 14 on esitetty perinteisen, passiivikomponenteilla toteutetun loistevalaisimen osat.



**Kuva 14. Perinteisen loistevalaisimen osat [39, muokattu]**

Loistevalaisin on matalapaineinen elohopeahöyryä sisältävä purkauslamppu ja sen toiminta perustuu putkessa tuotettuun kaasupurkaukseen. Putken täyteaineena on yleensä argonia tai kryptonaa. Kaasupurkaus saadaan käyntiin sytyttimen avulla ja reaktiota kontrolloidaan kuristimella tai elektronisella liitälaitteella. Kaasupurkauksen voimasta liikkuvat elektronit törmäävät putkessa oleviin elohopea-atomeihin, jolloin ne virittyvät. Elohopean ionien purkaessa viritystilansa, syntyy sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on ultraviolettisäteilyn aallonpituudella. Syntyneen säteilyn taajuus johtuu elohopean resonanssitaajuudesta, jonka aallonpituus on 256 nm. Ihmissilmä ei kuitenkaan pysty havaitsemaan ultraviolettia (UV) valoa näkyvänä valona, joten se pitää vielä muuttaa näkyväksi valoksi. Tämä tapahtuu putken pinnassa olevalla fosforiloisteaineella, jonka elohopean säteily virittää.

Perinteisen loistelampun spektri on esitetty kuvassa 15. Loistevalaisimen spektrissä korostuu kaksi aallonpituutta, toinen on vihreän ja toinen kellertävän valon aallonpituus. Tällaisella valolla värintoisto on melko huono, sillä näkyvä valo on kellertävää eikä valossa ole riittävästi eri värien aallonpituuksia. Loistelampun spektriä kutsutaan ainespektiksi, sillä tuotetun valon aallonpituus muodostuu käytetyn täyteaineen ominaisuudesta. Hyvä värintoisto saavutetaan kolmella fosforilla. Kolmen päävärin fosforit sekoitetaan, jolloin on mahdollista tuottaa jatkuva spektri päävärien välille ja saavuttaa  $R_a$ -arvo, joka on yli 80 ja päivänvalolampuilla jopa yli 90.



**Kuva 15. Perinteisen loistevalaisimen spektri [40, muokattu]**

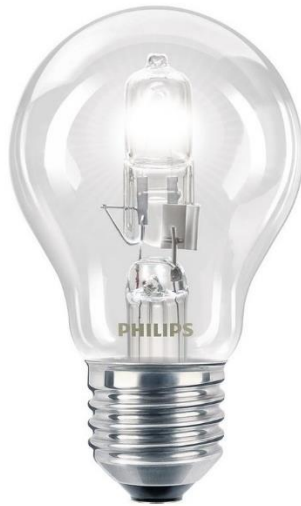
Loistelampun hyötysuhde on melko huono, vain n. 20 % syötetystä sähköenergiasta tuottaa näkyvää valoa ja loppu teho muuttuu lämmöksi eli loistelamppu tuottaa myös infrapunasäteilyä. Loistelampun valotehokkuus vaihtelee välillä 25-80 lm/W, mutta esimerkiksi T5 loistelampulla voidaan saavuttaa yli 100 lm/W valotehokkuus. Loistelamppujen käyttöikä vaihtelee 6000 ja 20 000 tunnin välillä. Loistelampun elinikää lyhentää purkausputken paineen alenema, joka voidaan myös havaita putken päiden tummumisena [40].

Loistevalaisimissa voidaan käyttää magneettikuristimia, mutta uusissa valaisimissa magneettikuristimen on korvannut elektroninen liitäntälaitte. Magneettikuristimilla on 15 % huonompi energiatehokkuus ja lyhyempi lampun käyttöikä sekä huonompi hyötysuhde.

Elektronisella liitäntälaitteella saadaan myös poistettua loistevalaisimista aiheutuva valaistustehokkuutta heikentävä sekä keskittymistä heikentävä välkyntä. Välkyntää ei voi silmällä havaita, mutta aivot kuitenkin rekisteröivät sen ja valo voi aiheuttaa ärsytystä. Elektronisella liitäntälaitteella taajuus nostetaan kymmeniin kilohertzeihin, jolloin vaikutelmana on tasainen valo [41].

## 4.2 Halogeenilamppu

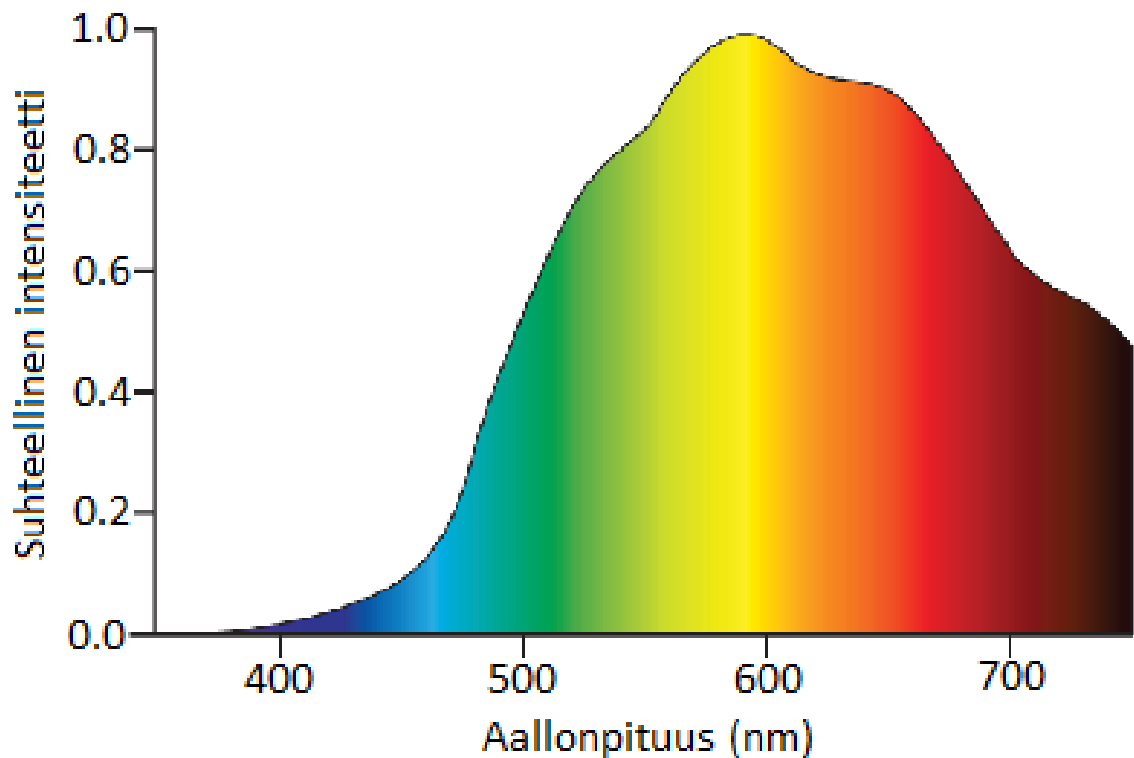
Halogeenilampun toiminta perustuu volframihehkulangan säteilyyn, joka saadaan aikaan sähkövirralla. Lamppu sisältää halogeenitäytekaasua, joka reagoi hehkulangasta irtoavien atomien kanssa. Hehkulanka höyrystyy vähitellen ja tämä höyry siirtyy lähemmäs lampun ulkopintaa. Kun hehkulangan ja ulkopinnan välissä on riittävä lämpötila, volframi ja halogeeni alkavat tuottaa molekyylejä. Kun lämpötila kasvaa riittävästi, alkavat molekyylit hajota, jolloin syntyy sähkömagneettista säteilyä, valoa. Alla olevassa kuvassa 16 on esitetty E27 kierrekantainen halogeenilamppu.



***Kuva 16. E27-kantainen halogeenilamppu [42]***

Halogeenilampun valovirran voimakkuus riippuu volframin lämpötilasta. Volframin maksimi valotehokkuus on lähellä sen sulamispistettä, 3380 °C, jossa sen valotehokkuudeksi saadaan 53 lm/W. Todellisuudessa valotehokkuudet ovat kuitenkin luokkaa 10-20 lm/W [43]. Halogeenilampun energiatehokkuus on huono, sillä vain 7 % sen ottamasta sähkötehosta muuttuu näkyväksi valoksi. Lisäksi halogeenilampun käyttöikä on melko lyhyt, vain noin 2000-3000 tuntia. Käyttöikä on puolet pienempi, kuin huonoimmilla loistelampuilla. Seuraavassa kuvassa 17 on esitetty halogeenilampun spektri. Halogeenilampun spektrissä voimakkain on kellertävä aallonpituus. Spektrin jakauma on hyvin laaja jatkuva verrattuna perinteisen loistevalaisimen spektriin.





*Kuva 17. Halogeenilampun spektri [44, muokattu]*

Halogeenilampun spektri on hyvin jatkuva. Siitä puuttuu käytännössä vain sinisen valon aallonpituudet. Valon kellertävä väri johtuu keltaisen ja punaisen aallonpituuden dominoinnista.

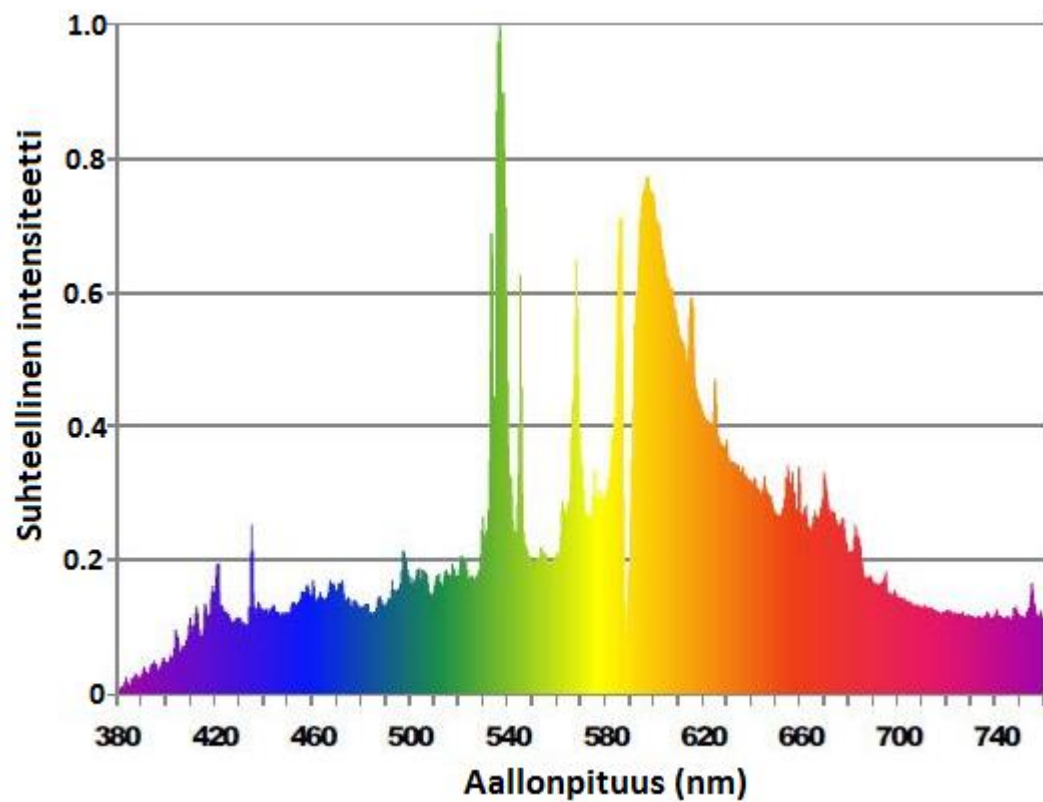
### 4.3 Monimetallilamppu

Monimetallilampun toiminta perustuu kaasupurkaukseen, joka tapahtuu elohopeahöyryssä. Höyryyn on lisätty eri metallien halogeeniyhdisteitä. Aluksi syntyvä säteily syntyy sytytyskaasussa tapahtuvasta purkauksesta, mutta lampun lämmitessä metallihalogeenit sekä elohopea alkavat höyrystyä, jolloin valon värilämpötila muuttuu ja valotehokkuus kasvaa. Monimetallilamput syttyvät hitaasti, yleisesti syttyminen normaaliin toimintatilaan kestää noin 4-6 minuuttia. Seuraavassa kuvassa 18 on esitetty kierrekannalla varustettu monimetallilamppu [41, 43].



**Kuva 18. Kierrekantainen monimetallilamppu [45]**

Monimetallilampun värilämpötila on välillä 3500-4200 kelviniä. Tämä johtuu lampun spektristä, sillä se koostuu yksinomaan 550-600 nm aallonpituuksista. Kuvassa 19 on esitetty monimetallilampun spektri.



**Kuva 19. Yleinen monimetallilampun spektri [46, muokattu]**

Spektriä sekä värilämpötilaa voidaan muuttaa käyttämällä eri täyteaineita ja eri seoksia täyteaineista. Monimetallilamppu vaatii toimiakseen sytyttimen. Lamppu ei sovi käyttökohteisiin, joissa valoja katkotaan useasti tai vaaditaan nopeaa syttymistä. Kun valo sammutetaan, uudelleensyttyminen vaatii ensin lampun jäähtymisen. Nopeampaan kytkentätiheyteen on myös saatavilla elektronisella liitäntälaitteella olevia lamppeja. Monimetallilampun valotehokkuus on noin 75-125 lm/W [41].

Monimetallilampun valotehokkuus on noin 75-125 lm/W. Valotehokkuus on parempi, kuin loistelampulla tai halogeenilampulla. Valotehokkuuteen vaikuttavat kuitenkin lampun rakenne ja teho. Monimetallilampun käyttöikä vaihtelee 6000 ja 20 000 välillä. Käyttöikä on samaa luokkaa loistelampun kanssa ja moninkertainen halogeenilamppuun verrattuna [43].

#### **4.4 Energiansäästölamppu**

Energiansäästölampulla tarkoitetaan valonlähdetä, jonka toiminta perustuu loistelamppuun. Energiansäästölamppu tuli markkinoille paljon energiaa kuluttavien hehkulamppujen korvaajaksi. Energiansäästölamput soveltuvat parhaiten yleisvalaistukseen. Lampun käyttöikä voi nousta jopa 20 000 tuntiin, mutta sen valontuotto heikkenee käytön myötä, jolloin lamppu voidaan joutua vaihtamaan jo ennen pakkauksessa luvattua käyttöikää [47].

Saman valotehon kuin perinteinen loistelamppu tuottava energiansäästölampun ottotehon on vain 20-30 % loistelampun tehosta ja se kestää 8-15 kertaa pidempään. Energiansäästölampun käyttöikä on sama, kuin elektronisella liitäntälaitteella varustetun loistelampun [41]. Halogeenilamppuun verrattuna energiansäästölampun käyttöikä on moninkertainen.

Energiansäästölamppuja on saatavilla erilaisissa muodoissa. Osa muistuttaa suuresti led-lamppua ja osassa on näkyvissä kierteinen loistevalaisinputki. Yleisesti esimerkiksi kierteisessä energiansäästölampussa putken kokonaispinta-ala määrittää lampun valontuoton. Seuraavassa kuvassa 20 on esitetty kaupallinen, kierteisellä putkella varustettu E27-kanlainen energiansäästölamppu.



***Kuva 20. E27-kantainen energiansäästölamppu [48]***

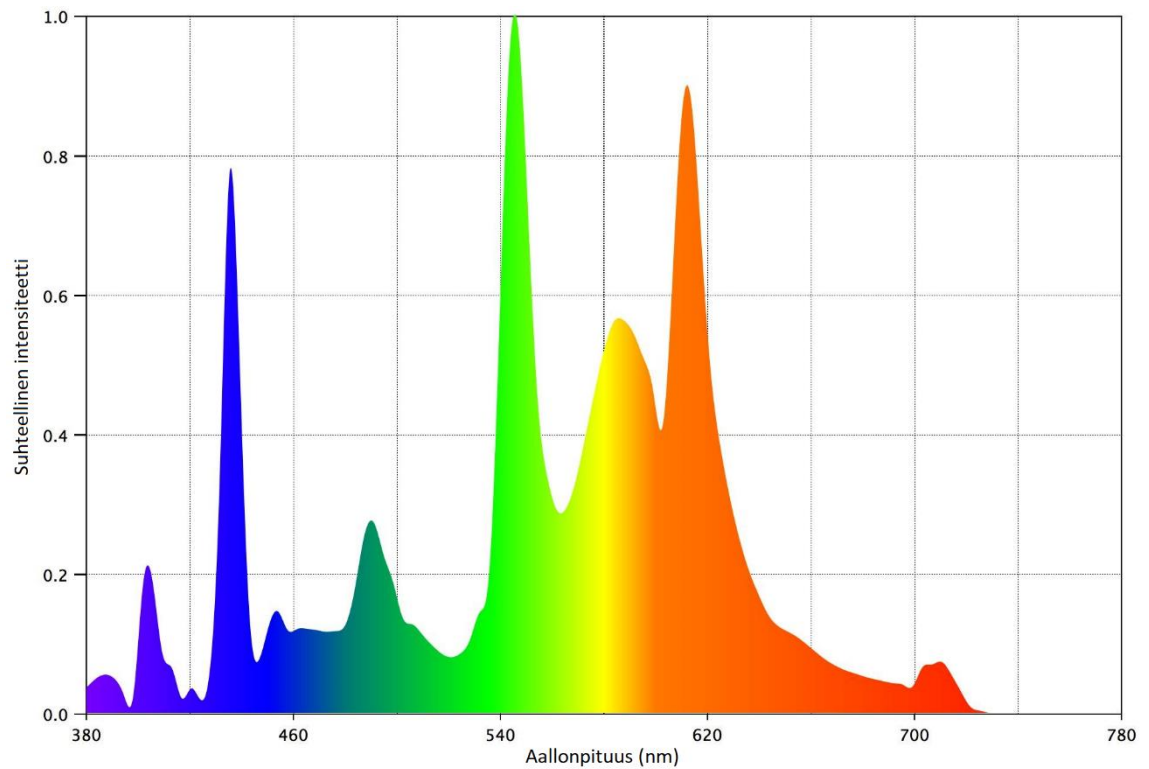
Vaikka energiansäästölamput ovatkin erinomainen energiatehokas valonlähde, ne eivät kuitenkaan sovellu kaikkiin valaistuskohteisiin. Energiansäästölamppu ei sovellu käyttökohteeseen, jossa valoa kytketään toistuvasti päälle ja pois. Jatkuva kytkentä lyhentää niiden elinikää huomattavasti. Syttymisnopeus on myös huomattavasti hitaampi kuin muilla valaisintyypeillä, joten sekin rajaa tiettyjä käyttökohteita pois.

Lamppua ei perinteisesti myöskään voi himmentää. On kuitenkin olemassa myös himmentimiin soveltuvia energiansäästölamppuja ja tästä ilmoitetaan pakkauksessa. Mikäli normaalia lamppua käytetään himmentimellä, sen elinikä lyhenee huomattavasti normaaliin käyttöön nähden.

Energiansäästölamput soveltuvat oikeinkäytettynä myös ulkokäyttöön. Lamppu tulee kuitenkin suojata sään vaikutuksilta. Energiansäästölampan valoteho voi myös olla pienempi matalissa käyttölämpötiloissa.

Energiansäästölamput ovat ympärisäteileviä lamppuja, jolloin esimerkiksi kohdevalaistuskäytössä ne vaativat heijastimen, jotta valo saadaan ohjattua haluttuun suuntaan. Näissä yleensä vaaditaan kapeamman valokeilan lamppuja, voimakkaampaan valokuvion saavuttamiseksi. Seuraavassa kuvassa 21 on esitetty periaatekuva loistevalaisimen spektristä. Spektrissä on havaittavissa samoja ominaisuuksia kuin perinteisen loisteputken spektrissä, mutta yleisesti energiansäästölampan värintoisto on parempi, kuin vanhojen loisteputkien.

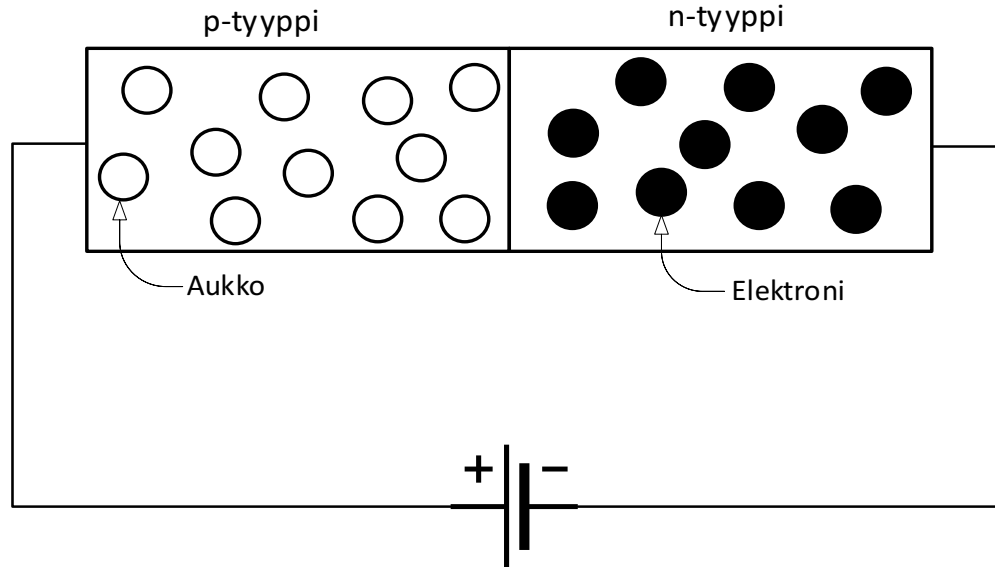
Valontuottamiseen energiansäästölamppuissa käytetään elohopeaa, joka on myrkyllinen metalli. Mikäli energiansäästölampan lasi rikkoontuu, pääsee myrkyllinen metalli huoneilmaan. Energiansäästölamppussa on keskimäärin n. 5 milligrammaa (mg) elohopeaa. Tämän johdosta energiansäästölamppu pitää kierrättää, eikä sitä saa hävittää muun talousjätteen mukana [49].



*Kuva 21. Periaatekuva loistevalaisimen spektristä [50, muokattu]*

## 4.5 Led-lamppu

Light Emitting Diode (LED) on valoa tuottava puolijohdekomponentti. Se koostuu p-n rajapinnasta, joka säteilee valoa, kun se on kytkettynä sopivaan jännitelähteeseen. Ledissä p- ja n-tyyppin puolijohteet on liitetty yhteen kuten seuraavassa kuvassa 22. Rajapinnassa olevat varauksenkuljettajat reagoivat ja näin rajapintojen välille syntyy tyhjennysalue. Puolijohdekomponenteille tyypillisesti sähkövirta voi kulkea vain yhteen suuntaan, anodilta katodille [51].



**Kuva 22. Ledin periaatekuva**

Tyhjennysalue aiheuttaa kynnysjännitteen rajapintojen välille. Kun pn-liitokseen kytketään jännite niin, että p-puoli on positiivisempi, kytketty jännite on vastakkainen kynnysjännitteeseen nähden ja tällöin enemmistövarauksenkuljettajilla on riittävästi energiaa siirtyä tyhjennysalueen yli. Tällöin led on myötäbiasoitu ja sen läpi kulkee virtaa ja se emittoi valoa. Emittedun valon aallonpituus riippuu käytetyistä puolijohdemateriaaleista sekä tyhjennysalueen energiasta. Ledin tuottaman säteilyn aallonpituus ( $\lambda$ ) voidaan laskea yhtälön (9) avulla.

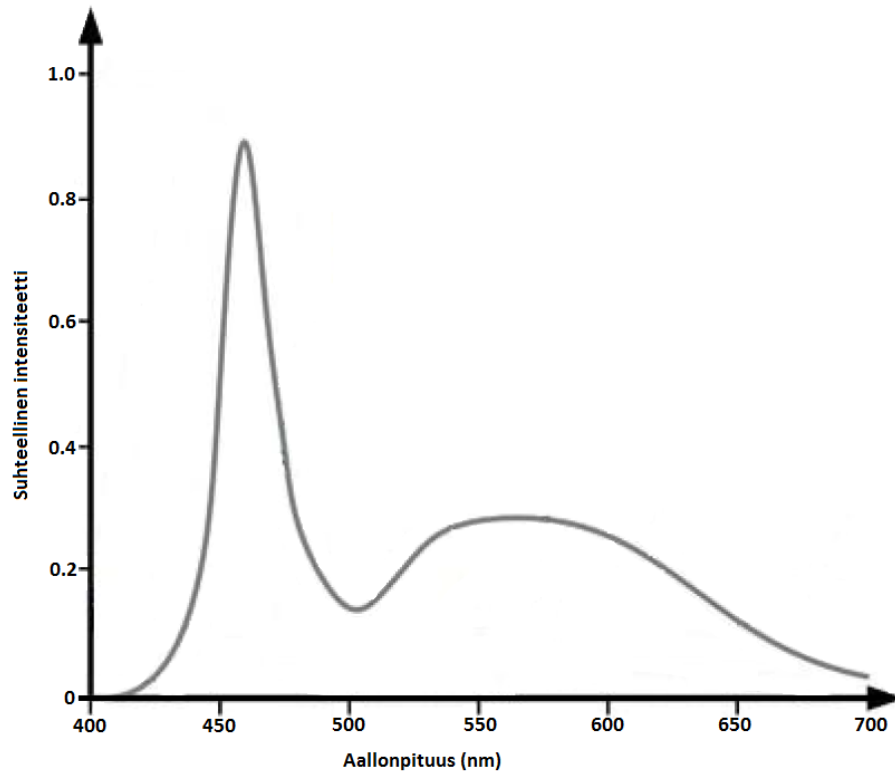
$$\lambda \approx \frac{hc}{E_g} = \frac{1,24}{E_g} (\mu m) \quad (9)$$

Yhtälössä  $h$  on Planckin vakio ( $\sim 6,626 \times 10^{-34}$  Js),  $c$  on valonnopeus ( $\sim 3 \times 10^8$  m/s) ja  $E_g$  on tyhjennysalueen energia (eV). Jotta led tuottaisi valoa, on syöttävän jännitteen oltava vähintään samansuuruinen kynnysjännitteen kanssa. Esimerkiksi sinisellä ledillä (aallonpituus 450-500 nm) säteilyenergia on 2,6 elektronivoltia (eV), jolloin kynnysjännitteen arvoksi tulee 2,6 V. Sinisellä ledillä puolijohdemateriaaleina käytetään Sinkkiseleenä ( $\text{ZnSe}$ ), Indiumgalliumnitridiä ( $\text{InGaN}$ ) ja piikarbidia ( $\text{SiC}$ ) [51].

Led-komponentin rakenne koostuu puolijohdesiruista, kotelosta sekä kytkentäpinneistä. Yksittäisen ledin tuottama valo on hyvin pieni, joten yleisesti led-valaisimissa ledejä on paljon. Led tuottaa paljon valoa ottotehoon nähden, jopa noin 300 lm/W. Ledin teoreettinen valotehokkuus on välillä 75-500 lm/W. Ongelmana kuitenkin on se, että suurin osa valosta heijastuu led-sirun sisällä ja absorboituu ennen kuin pääsee sirusta ulos. Ledien valotehokkuutta voidaan tulevaisuudessa kasvattaa merkittävästi, mikäli löydetään keino suunnata fotonit ulos sirusta.

Ledin värilämpötilaa muokataan käytetyillä puolijohdemateriaaleilla sekä erilaisilla värikkäillä linsseillä ja väriaineilla. Valkoinen valo tuotetaan yleisesti sinisellä ledillä, joka

on päällystetty keltaisella fosforilla. Tällöin spektrissä sinisen valon aallonpituus on hyvin voimakas ja fosforin avulla valoon saadaan myös muita aallonpituuksia, jolloin vaikutelma on valkoinen valo. Kuvassa 23 on esitetty fosforilla päällystetyn ledin spektri. Valkoinen valo voidaan tuottaa myös RGB-LED:illä. Tällöin samaan koteloon on pakattu punainen (626 nm), vihreä (525 nm) sekä sininen (470 nm) LEDi. Kun jokaisen aallonpituuden suhteellinen intensiteetti on yhtä suuri, saadaan valkoisen valon vaikutelma [41].



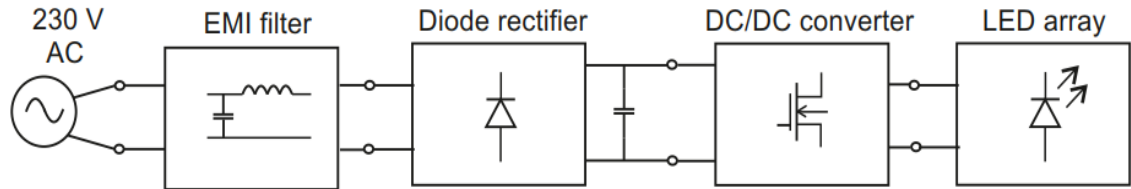
**Kuva 23. Fosforilla päällystetyn ledin spektri [52, muokattu]**

LEDit syttyvät ilman viivettä ja toisin kuin muut valonlähteet, ledin käyttöikä pitenee eli LED säilyttää valovirtansa paremmin, kun sitä kytketään päälle ja pois. LEDin käyttöiän odote on hyvin pitkä, jopa 50 000 tuntia. Verrattuna parhaisiin loistelamppuihin LEDin käyttöiän odote on n. 2.5-kertainen. Lisäksi LEDin valotehokkuus on omaa luokkaansa muihin ratkaisuihin verrattuna. LEDiä pystytään aina himmentämään helposti, kuten halogeenilamppuakin. Himmentimien toimivuus kuitenkin riippuu käytetystä liitäntälaitteesta. Liitäntälaite ei välttämättä toimi kaikilla perinteisillä himmentimillä. Osa liitäntälaitteista ei tue lainkaan himmennystä.

#### 4.5.1 Liitäntälaite

Kaupallisissa valaisinratkaisuissa LED-valaisin toimii pienellä tasajännitteellä. Liitäntälaite ohjaa ja varmistaa LEDille kulkevan virran suuruuden. Liitäntälaitteen periaatekuva on esitetty kuvassa 24. Joissain tapauksissa on mahdollista käyttää lineaarista tehöläh-

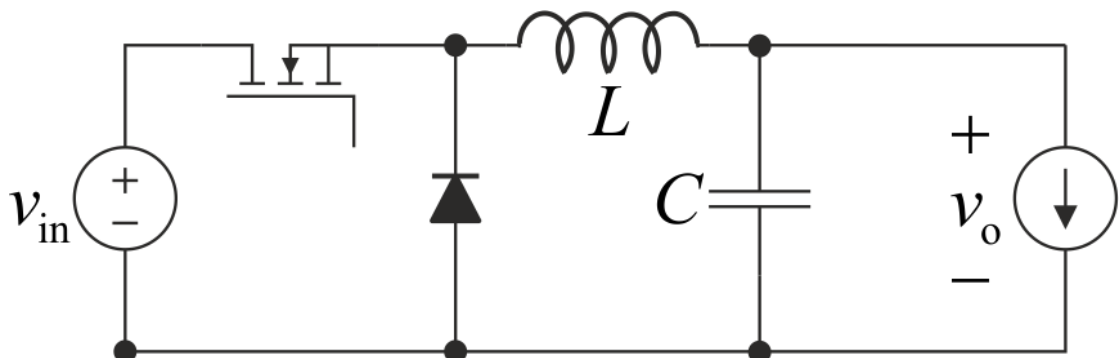
dettä, mutta käytännössä kaupallisissa valaistuskomponenteissa liitäntälaitte on aktiivinen, eli virtaa ohjataan kytkimen avulla. Linearisissa teholähteissä energiatehokkuus on todella huono aktiivisiin ohjainlaitteisiin verrattuna. Toisaalta kytkimellisissä liitäntälaitteissa kytkentäilmiöt, nopeat reunat vaativat suodatusta syntyviä sähkömagneettisia häiriöitä vastaan.



**Kuva 24. Yksinkertainen periaatekuva led-valaisimen liitäntälaitteesta**

Tehonsyötön suunnasta ledit ovat vakiojännitteinen kuorma, jolloin tehonlähteen tulee pitää syötettävä virta mahdollisimman vakiona. Monesti käytetään kuitenkin vakiojännitelähdettä, joka myös pitää virran suuruuden lähes vakiona. Led-valaisimissa käytetään useita led-komponentteja, jolloin niitä kytketään pitkiksi sarjakytkentäketjuiksi ja näitä ketjuja useita rinnakkain. Kun suunnitellaan usean ledin järjestelmiä, tulee taata, että kaikilla led-ketjuilla kulkee yhtä suuri virta.

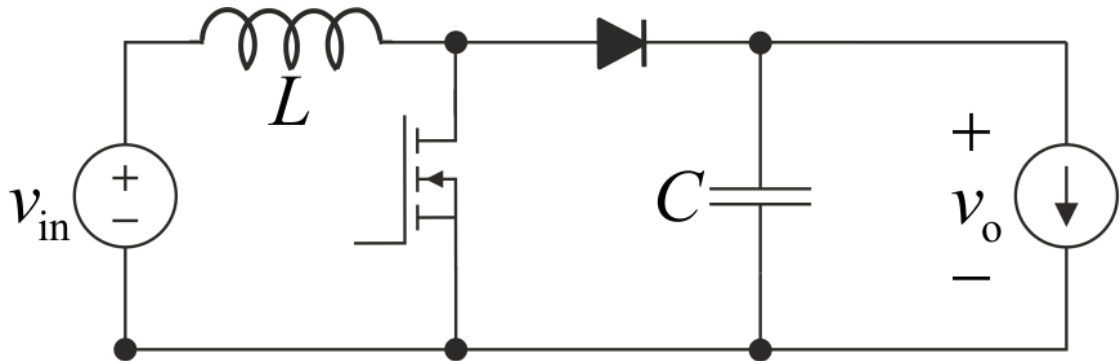
Yksinkertaisin tehonlähde on buck-hakkuri, joka on esitetty kuvassa 25. Kun kytkin on johtavassa tilassa, virta kulkee kelan läpi ledeille. Kun taas kytkin on auki, kelaan varastoitunut energia tuottaa ledille virtaa. Ennen buck-hakkuria, vaihtosähkö tasasuunnataan esimerkiksi diodisillalla. Buck-hakkuri on laskeva hakkuri, joten syötön jännitetason tulee olla suurempi kuin vaadittu ulostulojännite. Buck-hakkuri toimii huomattavasti paremmalla hyötysuhteella kuin lineaarinen tehonlähde varsinkin, jos sisääntulojännite on huomattavasti suurempi kuin haluttu ulostulo. Ledien tarvitsema jännite on niin pieni verkkojännitteeseen nähden, että kun verkkojännite tasasuunnataan, tarvitaan aina buck-hakkuri [53].



**Kuva 25. Buck-hakkurin periaatekuva**



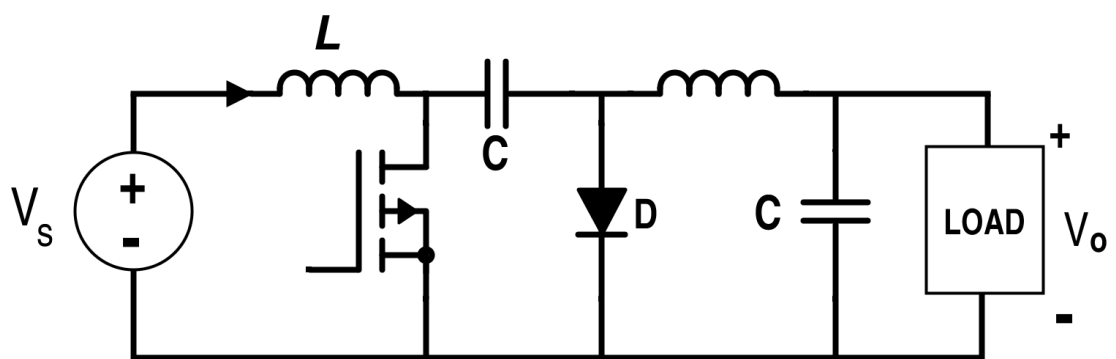
Boost-hakkuri on esitetty kuvassa 26. Boost-hakkuri voi toimia kahdella eri tavalla, joko jatkuvassa johtavuustilassa (CCM) tai epäjatkuvassa johtavuustilassa (DCM). Boost-hakkuri on jännitettä nostava aktiivinen teholähde, jota käytetään, kun haluttu ulostulojännite on vähintään 1.5-kertainen sisääntulojännitteeseen nähden.



**Kuva 26. Boost-hakkuri**

Boost-hakkuria käytetään CCM-tilassa silloin, kun ulostulojännite on enintään kuusinkertainen sisääntulojännitteeseen nähden. DCM-tilaa käytetään tätä suuremmilla suhteilla. Sähkömagneettiset häiriöt ovat suurempia, kun käytetään DCM-tilaa. Käytettäessä boost-hakkuria, yleisimmät suunnitteluvirheet näkyvät riittävän ulostulon ylijännitesuojan puutteena sekä pienellä valonlähteellä testattaessa voidaan havaita valonlähteen ylioletavan jännitteen olevan pienempi kuin syöttöjännite. Tällöin virta kasvaa ja ledit voivat tuhoutua [53].

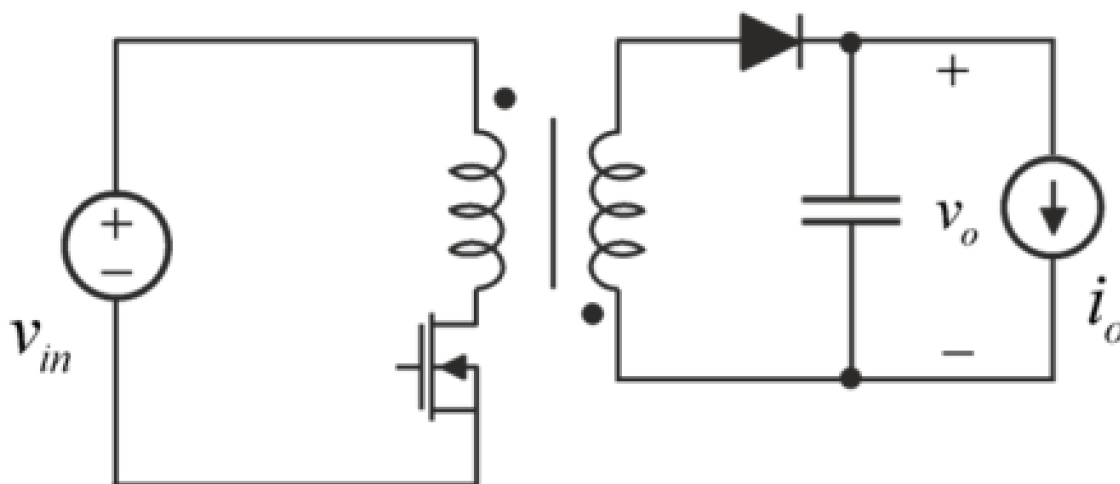
Boost-buck hakkuri voidaan toteuttaa yhdellä kytkimellä ja se on käytännössä edellisten kaskadikytkentä. Hakkurityypin etuna on sen monipuolisuus. Sillä voidaan nostaa tai laskea ulostulojännitettä. Kuvassa 27 on esitetty Cuk-hakkuri.



**Kuva 27. Cuk-hakkuri [54]**

Tätä hakkurityyppiä käytetään yleisesti autoteollisuudessa tai sovelluksissa, joissa halutaan ohjaimen toimivan hyvin laajalla käyttöjännitealueella tai kuormalla. Sen etuna on kapasitiivinen eristys, joka suojaa ledejä kytkimen rikkoutumiselta. Tällöin sisäänmeno menee oikosulkuun eikä vahingoita ledejä. Yleisimmät topologiaratkaisut ovat Cuk ja SEPIC [53].

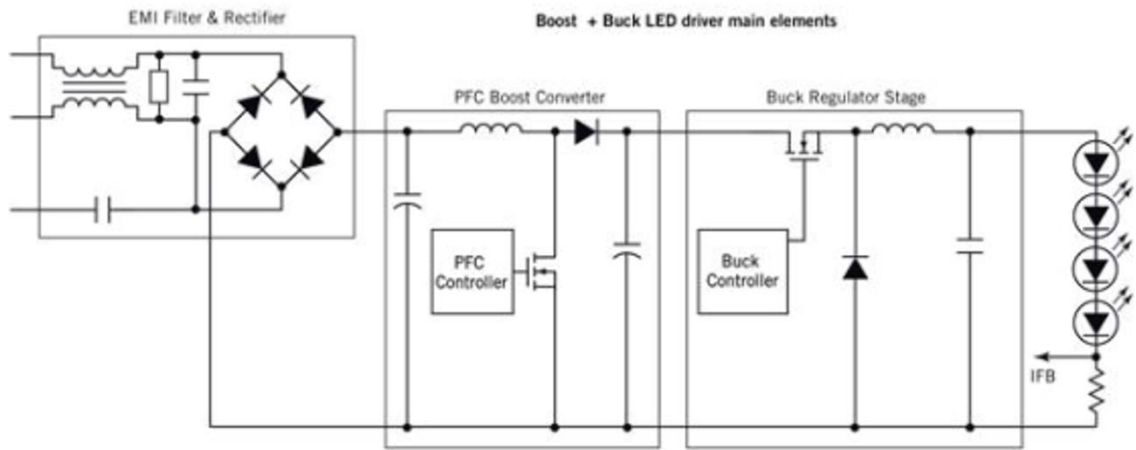
Flyback-hakkurin toiminta perustuu buck-boost hakkuriin, jossa kelan tilalla on muuntaja. Flyback-hakkuri on esitetty kuvassa 28. Flybackin toiminta perustuu muuntajassa tapahtuvaan sähkömagneettiseen induktioon. Muuntajaan varastoituu energiaa, kun MOSFET on johtavassa tilassa ja energia sekä magneettivuo purkautuvat. Toisiopuolella on tällöin positiivinen jännite ja diodi on myötäbiasoitu, eli johtavassa tilassa [55].



**Kuva 28. Flyback-hakkuri [56]**

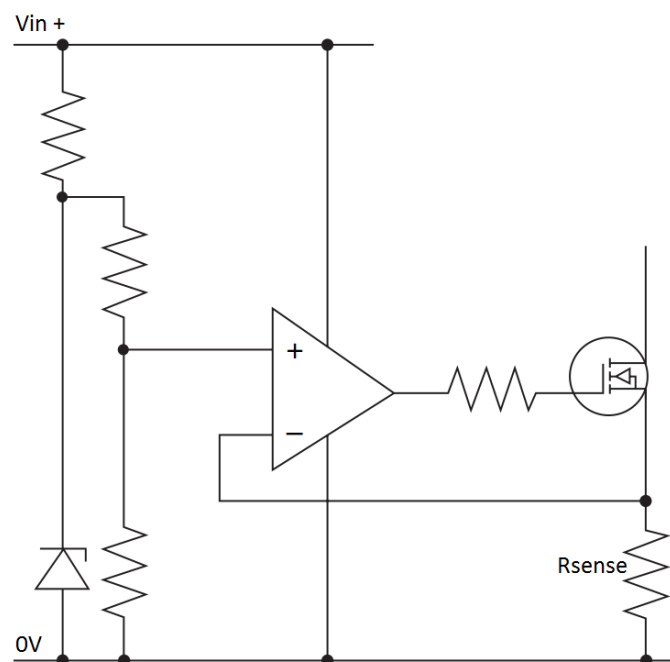
Sen etuina on helppo toteutus vähäisillä komponenteilla, jolloin siitä saadaan myös pienikokoinen. Flybackilla saavutetaan myös galvaaninen erotus kuorman ja syöttöpuolen välillä.

Ledien tehonlähteille on esitetty standardissa tehokerroin- sekä THD vaatimuksia, kun valaisimen teho ylittää 25 W. Yleisimpänä tehokertoimen korjauspiirinä (PFC) käytetään boost-hakkuria. AC-jännite nostetaan noin 400 volttiin ja kondensaattorin virtapulssien amplitudit pyritään saamaan siniaallon muotoisiksi. Virtaa katkotaan vakiojaksolla. Toinen vaihtoehto on käyttää flyback-hakkuria. Ensiövirtaa katkotaan, kun riittävä virtataso on saavutettu. Jotta tehokertoimesta saadaan hyvä, pitää ensiövirtaa katkoa vakiojaksolla. Tällöin virran aaltomuoto seuraa syöttöjännitteen jaksoa. Toisiovirrassa on kuitenkin kaksinkertainen taajuus. Tämä vaatii suuren kondensaattorin lähtöön suuren rippelin suodattamiseksi [41]. PFC-piiri voidaan myös toteuttaa passiivisella ”valley fill” tekniikalla. Tällä tekniikalla vaaditut lisäkomponentit ovat vain kolme diodia sekä kaksi kondensaattoria [57]. Tekniikalla ei kuitenkaan päästä samoihin tuloksiin kuin aktiivisella tehokertoimen korjauspiirillä. Kenttämittausten aaltomuotojen perusteella kuvassa 57 on käytössä aktiivinen tehokertoimen korjauspiiri ja kuvassa 69 passiivinen. Seuraavassa kuvassa 29 on esitetty yleisen liitântälaitteen rakenne. Liitântälaitte koostuu tulosuotimesta, tasasuuntaussillasta, PFC-piiristä (boost) sekä regulointipiiristä (buck).



**Kuva 29. Yleisesti käytetty liitäntälaitteen rakenne [58]**

Yksinkertainen tehonlähde on kuitenkin lineaarinen tehonlähde. Lineaarisia tehonlähdeitä käytetään yleisimmin kohteissa, joissa vaaditaan erityisen hyvää sähkömagneettista yhteensopivuutta, sillä lineaariset tehonlähde eivät käytännössä tuota lainkaan sähkömagneettista häiriötä (EMI). Esimerkki lineaarisesta tehonlähdeestä on esitetty kuvassa 30.



**Kuva 30. Esimerkki vakiovirtalähteenä toimivasta jänniteregulaattorista [41]**

Lineaarisen tehonlähde hyötysuhde heikkenee, kun jännite-ero syöttävän piirin ja ledien yli olevan jännitteen välillä kasvaa. Tällöin myös häviöt kasvavat, jotka ovat käytännössä ainoastaan lämpöhäviöitä ja vaaditaan hyvä lämmönjohtokyky, esimerkiksi jäähdytys-siili. Kun syöttöjännite on vain vähän suurempi kuin ledien vaatima jännite, lineaarinen tehonlähde voi olla parempi hyötysuhteeltaan kuin aktiivikomponenteilla toteutetut tehonlähdeet. Lineaarisen tehonlähde hyötysuhdetta voidaan parantaa käyttämällä mittaus-vastuksen ja erovahvistimen välissä operaatiovahvistinta [41].

### 4.5.2 Led-valoputket

Led-valoputket ovat tarkoitettu korvaamaan loisteputket perinteisissä loisteputkivalaisimissa. Mikäli vanha runko on tarkoitettu T8-putkelle, tämän korvaaminen led-putkella vaatii vain sytyttimen tilalle tulevan oikosulkupalan sekä itse putken vaihdon [59]. Kuvassa 31 on esitetty loisteputkien tilalle asennettavia led-putkia.



**Kuva 31. Led-putki [60]**

Markkinoille on tullut myös led-putkia, jotka soveltuvat käytettäväksi elektronisilla liitäntälaitteilla varustetuissa valaisimissa ilman muutostöitä. Näille retrofit-putkille ei ole vielä olemassa turvallisuutta koskevaa IEC tai EN standardia. Tästä johtuen lamppujen valmistajilla on vastuu varmistaa, että lamppu täyttää voimassa olevat standardit soveltuvien osin. Mikäli turvallisuusriskejä tai sähkömagneettisia häiriöitä on havaittavissa putkien vaihdon jälkeen, vastuu on sillä toimijalla, joka on saattanut retrofit led-putket markkinoille. Kun vanhat loisteputket korvataan retrofit led-putkillla, valaisimen CE-merkintä sekä muut sertifikaatit säilyvät voimassa.

Mikäli asennuksissa käytetään muutossarjaa, tällöin asennus vaatii vanhan loisteputkivalaisimen rakenteen muuttamista. Muutossarjassa tulee mukana esimerkiksi liitäntälaitteet, ohjauselektronikka, johdotukset sekä yksityiskohtaiset asennus- ja testausohjeet. Kun valaisimen rakennetta muutetaan, alkuperäinen CE-merkintä ja muut sertifikaatit eivät ole voimassa. Lisäksi valaisimiin tulee lisätä merkintä, että valaisimet on muutettu toimimaan led-tekniikalla. Asennukset saa suorittaa vain sähköalan ammattihenkilö [61].

### 4.5.3 Korvaavat led-lamput

Led-lamppuja on saatavilla lähes jokaisella yleisesti käytössä olevalla kannalla, kuitenkin rajoituksena on led-elementin sekä liitäntälaitteen tuomat rakenteelliset mitat. Alla olevassa kuvassa 32 on esitetty E27-kantaiset led-lamput.



***Kuva 32. Korvaava E27-kantainen led-lamppu [62, 63]***

Tämänkaltaisissa led-lampuissa, joissa liitäntälaite on integroituna lampun runkoon, lämpötilajakauma poikkeaa olennaisesti esimerkiksi hehkulamppujen lämpötilajakaumasta. Ledissä kuumat pisteet sijoittuvat lähelle kantaa, kun taas halogeenilampussa kuumin piste on pallokuvun lakipisteessä, tämä voidaan havaita kuvasta 37. Tämä saattaa tuoda ongelmia, kun led-lamppuja käytetään alun perin halogeeni- tai hehkulampulle suunnitellussa valaisinrungossa.

#### 4.5.4 Led-valaisimet

Led-valaisimet ovat sellaisia led-tekniikkaa hyödyntäviä valaisinratkaisuja, joissa valonlähdettä ei voida samalla tavalla vaihtaa, kuin esimerkiksi E27-kantaisen valaisinrungon lamppu. Ledit ovat kiinteästi asennettu valaisinrunkoon, kuten kuvassa 33 on esitetty.

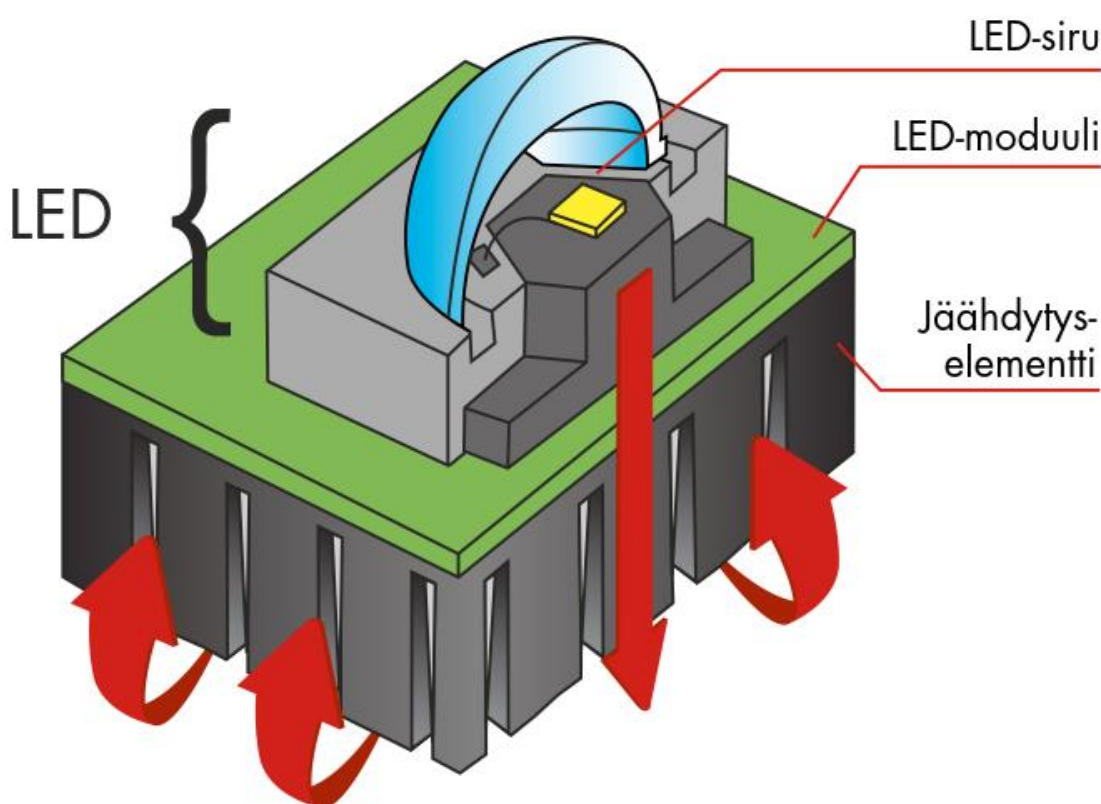


***Kuva 33. Led-valaisimia [64, 65]***

Led-valaisimille on lukuisia käyttökohteita, sillä monesti niiden rungot ovat varsin pieniä ja valaisinrungot voivat olla hyvin monimuotoisia tai hyvin huomaamattomia. Valaisimen rakenteen vapauden vuoksi led-valaisimissa voidaan hyödyntää myös hyvin monipuolisesti erilaisia sensortekniikoita, kuten liiketunnistusta tai hämärätunnistusta. Asennusmahdollisuudet yhdistettynä riittämättömään ymmärrykseen valaisimien turvallisuusvaatimuksista voi erityisesti maallikoiden tekemissä asennuksissa mahdollistaa turvallisuusriskin.

## 5. LABORATORIOTUTKIMUKSET

Laboratoriossa tutkittiin led-valaisimien lämpenemiä, sillä erittäin yleinen käsitys on, että led ei lämpene, joten se on automaattisesti paloturvallinen. Virhekäsitys johtuu mahdollisesti siitä, että ledin spektristä puuttuu lämpönä tuntuva infrapunasäteilyn aallonpituus. Kuitenkin ledin hyötysuhde on huono, 80-90 % ledin kuluttamasta sähkötehosta muuttuu lämmöksi ja vain jäljelle jäävä osa tuottaa valoa. Kuitenkin ledin valotehokkuus on hyvä, eli valontuotto tehon suhteen (lm/W). Alla olevassa kuvassa 34 on esitetty led-elementin rakenne.



**Kuva 34. Led-elementti [66]**

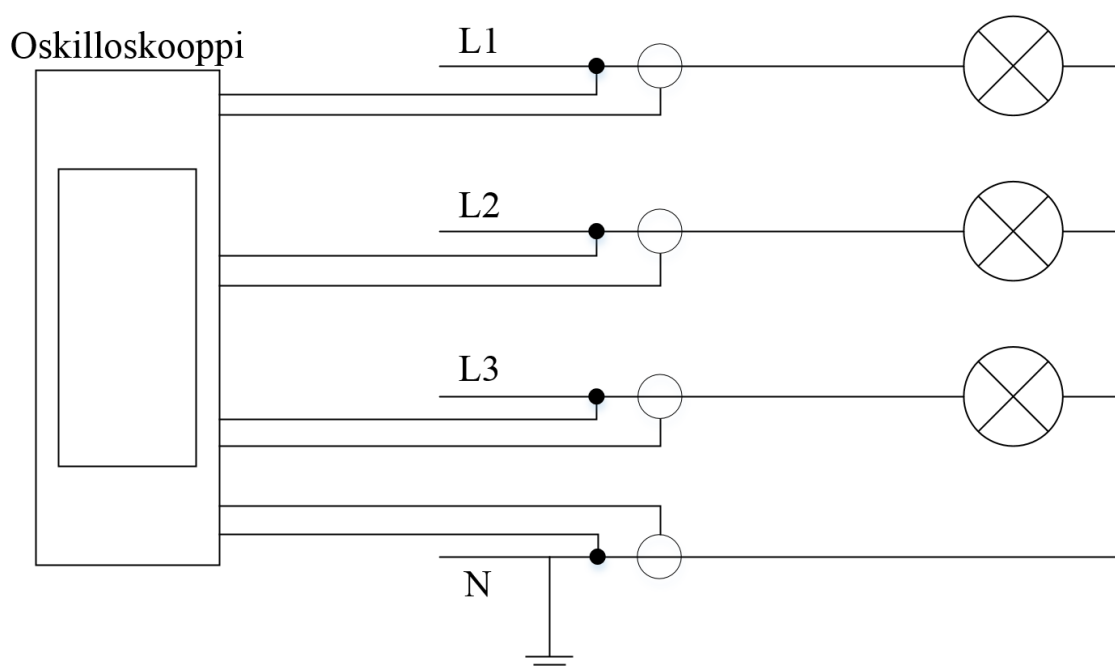
Kun vanha valaisin korvataan led-tekniikkaa hyödyntävällä valaisimella, pitää varmistua valaisimen yhteensopivuudesta kohteeseen, vaikka uusi valaisin näennäisesti sopisikin vanhaan kantaan tai esimerkiksi uppovalaisimen tapauksessa vanhalle valaisimelle tehtyyn aukkoon.

Ledien lämmöntuotto on merkittävää ja tästä syystä teholedeillä tulisi aina olla jäähdytys-elementti. Lämmöntuotto on kuitenkin huomattavasti pienempi kuin muilla yleisillä valaisintyypeillä. Korkea hukkalämpö on kuitenkin ongelma ledille itselleen. Led-elementin lämmönsietokyky on hyvin rajallinen, joskin koko ajan on kehitetty paremmalla lämmönkestolla olevia ledejä.

## 5.1 Laboriormittaukset

Laboriormittauksissa lampuja syötettiin Elgar SW5250A ohjelmoitavalla teholähteellä. Mittaukset suoritettiin Tektronix TBS 2000 – sarjan digitaalisella oskilloskoopilla käyttäen Tektronixin TCP 312A mittapäätä sekä AC jännite mitattiin differentiaalimitteen P5200A avulla. Lampujen lämpenemää mitattiin Fluken TiS45 – lämpökameralla.

Laboriormittauksissa tarkasteltiin useiden eri valmistajien E27-retrofit lampuja, upotettavia valaisimia, paneelivalaisimia sekä led-nauhoja. E27-kantaisissa valaisimissa tehtiin mittauksia myös vertaillen ledin, energiansäästölamput ja halogeenilamput termistä käyttäytymistä erilaisissa sähköverkko- ja käyttöolosuhteissa. Alla olevassa kuvassa 35 on esitetty mittauskytkennän periaatekuva laboriormittauksissa.



**Kuva 35. Laboriormittausjärjestelyt**

Laboriormittauksissa keskityttiin erilaisten sähköverkkoympäristöjen vaikutukseen lampun lämpenemään. Mittauksissa käytettyjä erilaisia sähköverkko-olosuhteita olivat:

- Normaali sähköverkko, 230 V, 50 Hz, ei yliaaltoja
- Teollisuusverkko, 230 V, 50 Hz, 3. (6 %), 5. (8 %), 7. (5 %) ja 11. (5 %) yliaalto
- Heikko verkko, 230 V, 50 Hz, jännitekuoppia vaihtelevasti 30-90 % nimellisestä, kesto 2-10 verkkojaksoa sekä taajuus -ja jännitevaihteluja 90-110 % välillä

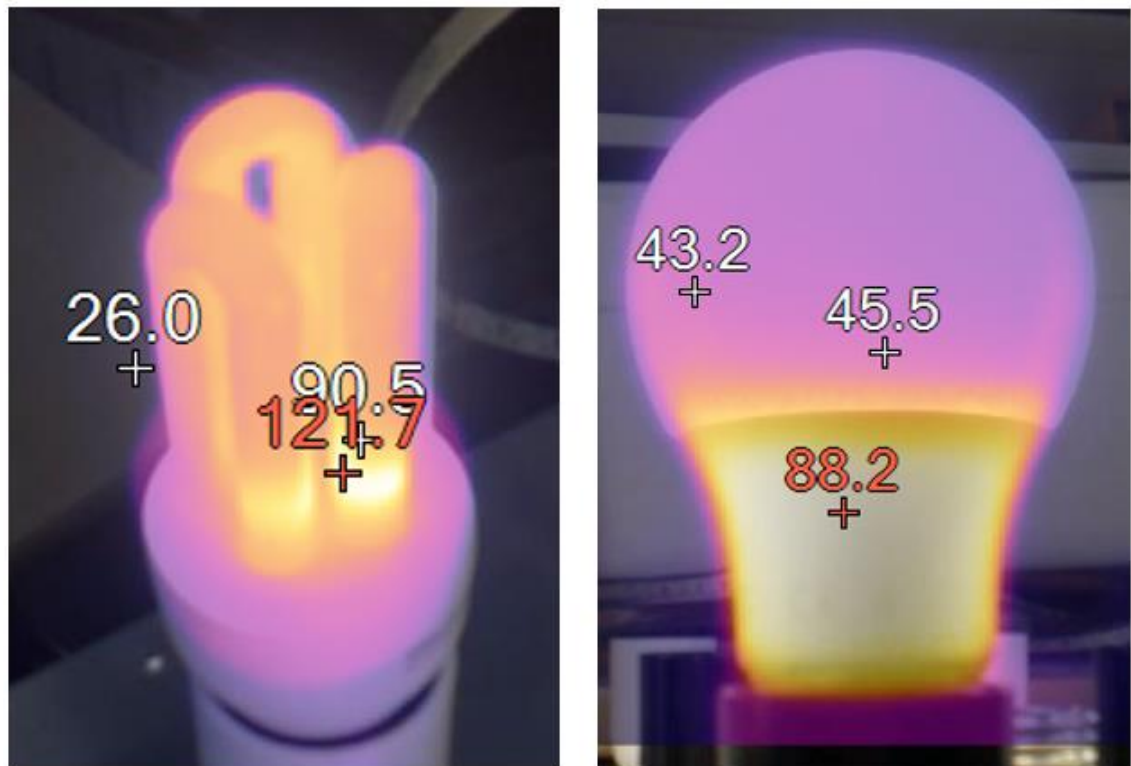
Verkko-olosuhteissa käytettiin jatkuvan tilan lisäksi myös seuraavia kytkentätilanteita:

- Verkon häiriöt ja vikatilanteet, AJK ja PJK (PJK 0.2 s, AJK 120 s, sykli 0.2-1 s)
- Pitkäaikainen jännitteenalenema (eri syvyyksiä ja kestoja 50-90 %, 5 s-15 min)
- Liiketunnistin, suuri kytkentätiheys (1-5 s syklillä)



Suurinta osaa mittauksissa käytetyistä sähköverkon häiriöistä ei ainakaan käytetyssä laajuudessa havaita sähköjakeluverkossa. Kaikki käytetyt ilmiöt ovat todellisia, mutta osassa on pyritty hakemaan normaalista poikkeavia ääritilanteita, jolloin voidaan varmistua lamppujen toiminnasta jakeluverkossa.

Alla olevassa kuvassa 36 on esitetty energiansäästölamppu sekä led-lamppu. Molemmat soveltuvat käytettäväksi samassa valaisinrungossa. Vertailumittauksia suoritettiin yllä mainituilla verkko-olosuhteilla sekä käyttöolosuhteilla. Tuloksissa on esitetty vain merkittävimmät tilanteet eli kun lamppujen lämpenemä on ollut kaikista suurinta.



**Kuva 36. Energiansäästölamppun ja led-lampun lämpenemä samassa ympäristössä ml. sähköverkkoympäristö (teollisuusverkko, 3s kytkentätiheys)**

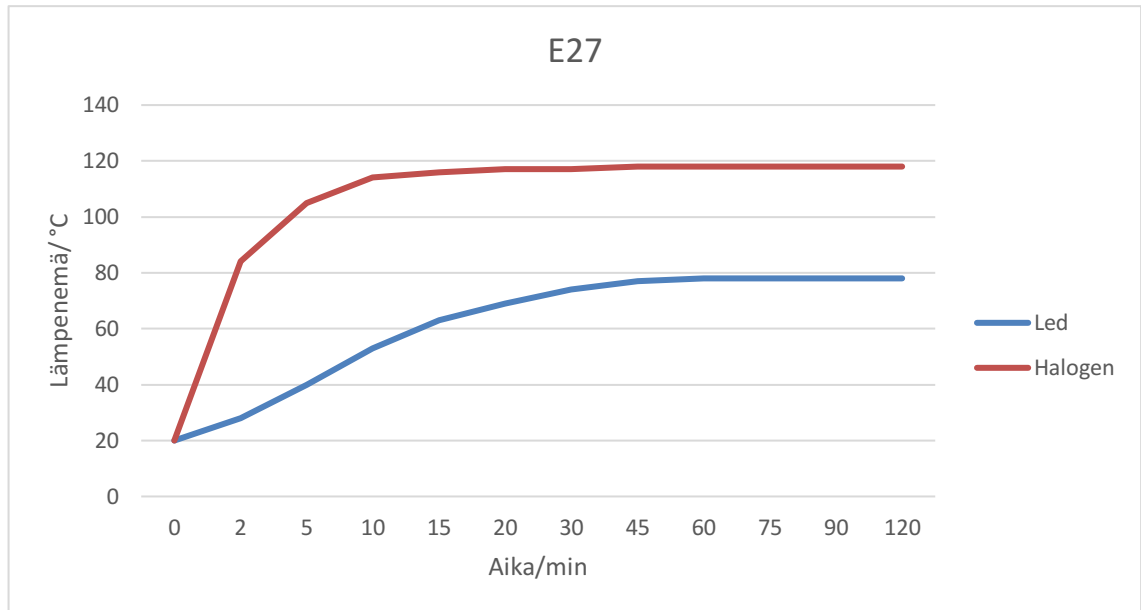
Lamput olivat vapaassa ilmankierrossa, ilmastoidussa laboratoriossa. Lamput ovat olleet päällä kolme tuntia. Led-lampulla kuumin piste on lampun kannassa, jossa ohjauselektronikka ja itse valonlähteet sijaitsevat. Energiansäästölampussa kuumin piste on aivan putken juuressa. Yliaaltoisessa ja paljon kytkentöjä sisältävässä koestusverkossa energiansäästölamppun juuresta loisteputki alkoi tummua. Mitä enemmän putki tummui, sitä suurempi oli sen lämpenemä. Lopulta lamppu ei enää toiminut. Vastaavasti led-lampussa yliaaltopitoisessa verkossa lämpenemä on hieman suurempaa kuin ideaalisessa, sillä tehoasteen kelassa tapahtuu ylimääräistä lämpöhäviötä yliaaltojen seurauksena.

Alla olevassa kuvassa 37 on esitetty halogeenilampun sekä led-lampun lämpenemä puolelta tunnissa, kun vapaa ilmankierto on estetty. Kuvasta 37 voidaan havaita, että halogeenilampun kannan lämpenemä on pienempi kuin led-lampussa. Paloturvallisuuden kannalta kummankaan lampun kannan pintalämpötila ei ole vaarallisella tasolla.



***Kuva 37. Halogeenilamppu ja led-lamppu kun lamput ovat samassa sähköverkkoym-  
päristössä ja vapaa ilmankierto on estetty, 30 min mittaus***

Halogeenilampussa sen sijaan pallokuvun lakipisteessä ollaan jo 130 – asteessa. Halogeenilampuilla voidaan saada helposti huolimattomalla käytöllä aikaan paloturvallisuusriskejä, mikäli lampun lähellä on herkästi syttyvää materiaalia. Seuraavassa kuvassa 38 on esitetty E27-kantaisen led-lampun sekä halogeenilampun kannan pintalämpötila, kun lamppujen ympärillä vapaa ilmankierto on estetty sekä kannan ympärillä vapaa ilman-  
kierto on estetty.

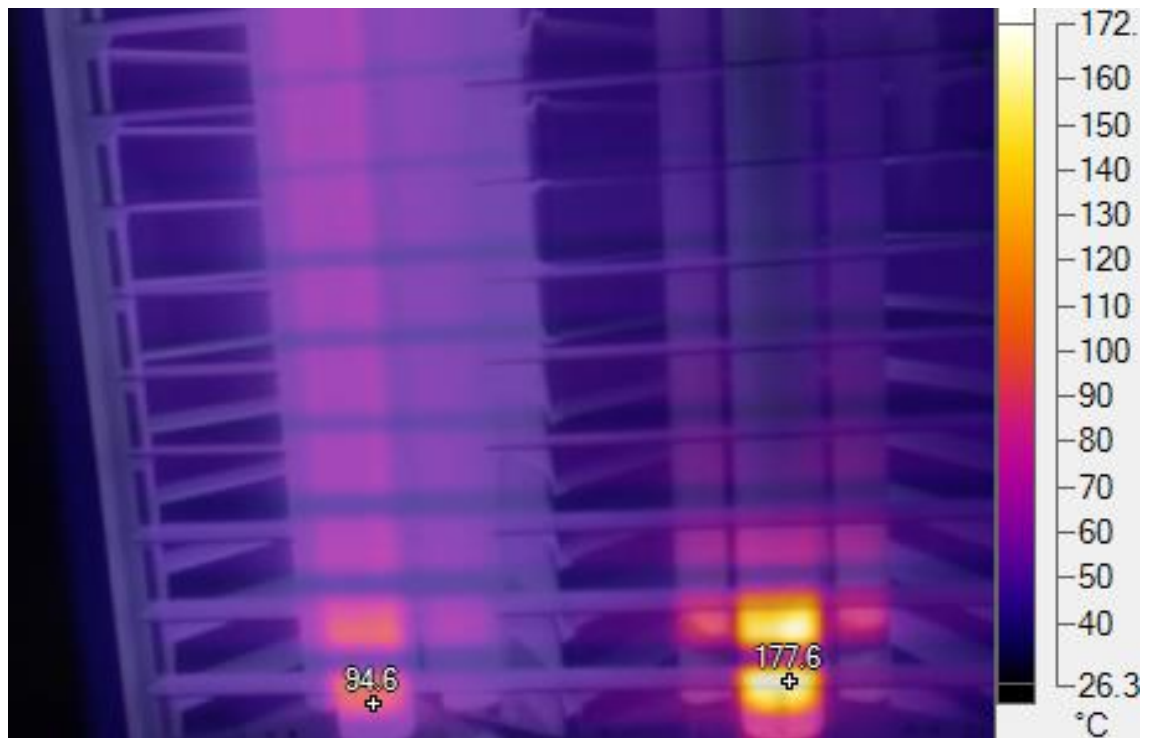


**Kuva 38. E27-kantaisten ledin ja halogeenin kannan pintalämpötila ajan funktiona, kun vapaa ilmankierto on estetty**

Tuloksista nähdään, että vaikka aiemmin led-lampussa kannan pintalämpötila oli lyhyen käyttöjakson jälkeen halogeenia korkeampi, led-lampun lämpötila jää huomattavasti pienemmäksi kuin halogeenin, vaikka ledillä kuumat pisteet sijaitsevatkin aivan lampun kannassa.

Vaikka tutkimus keskittyy led-tekniikkaan, tutkittiin vielä lisäksi loistevalaisinten paloturvallisuusriskejä. Suurin paloturvallisuusriski on loistevalaisinten kuristin. Kuristimella varustettu valaisin yrittää jatkuvasti sytyttää putkea, vaikka se olisi vikaantunutkin. Tällöin syntyy virtapiikki, joka saattaa aiheuttaa myös häiriöitä muualle verkkoon. Loistevalaisinten paloturvallisuusriskejä tuli esiin erityisesti kyselytutkimuksessa.

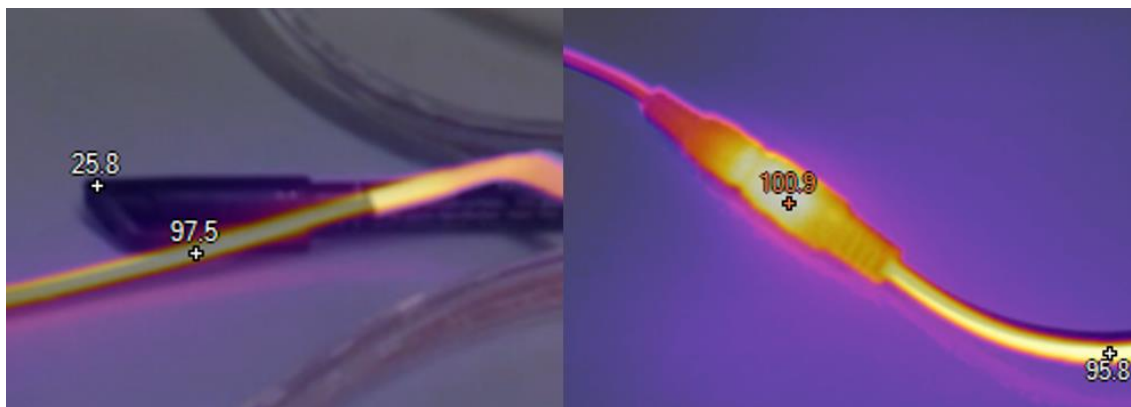
Loistevalaisimen putken lämpötila riippuasennuksessa on noin 100 °C. Kuitenkin esimerkiksi päistä hehkuva putki on lähes 200 °C. Kuvassa 39 on lämpökamerakuva ehjästä, normaalisti toimivasta loisteputkesta sekä epäkunnossa olevasta putkesta, jossa putken molemmat päät ”hehkuvat”.



***Kuva 39. Loistevalaisimen normaalisti toimiva putki vasemmalla ja päistä hehkuva putki oikealla***

Asennustavasta riippuen tämä on paloturvallisuusriski, mutta erityisesti sähköturvallisuusriski. Valaisimen rungon sisälle on sijoitettu johdot ja suuren lämpötilan pitkäaikaisvaikutuksesta johtimien eristimet sulavat. Tutkimuksessa on tullut vastaan valaisimia, joissa MMJ-kaapelin vaippakin on sulanut ja jäljellä on vain paljaat kuparijohtimet. Syynä on ollut joko virheellisesti suunniteltu valaisin tai huollon laiminlyönti.

Kuvassa 40 on esitetty pienitehoisen led-nauhan vikatilanne, jossa nauhan avoimeen päähän tehtiin oikosulku. Liitälaitteen tiedot olivat: AC 100-240 V, 50/60 Hz, 1.6 A, DC 24 V, 2A. Led-nauha myytiin liitälaitteen kanssa yhtenä pakettina. Led-nauha on vapaassa ilmankierrossa levitettynä pöydälle. Nauhan johtimet ja liittimet alkavat kuumentua hyvin nopeasti. Nauhan lämpötila on kohonnut 100 – asteeseen alle 30 minuutissa. Vastaava vikatilanne voisi tapahtua, kun nauhaa käytetään sisustusvalona, esimerkiksi sohvan alla tai verhojen yhteydessä.



**Kuva 40. Vikatilanteessa oleva led-nauha**

Kuvan 40 led-nauha on hyvin pienitehoinen, mutta vastaavat ongelmat ovat tehokkaammillakin nauhoilla, jolloin virrat ovat useita kymmeniä ampeereja. Oikosulku voi kehittyä myös pidemmällä aikavälillä, kun esimerkiksi tehokkaan led-nauhan kiinnityksessä peitetään yksittäisiä led-elementtejä niin, että ne eivät pääse säteilemään valoa tai lämpöä ympäristöönsä. Toinen hyvin vaikeasti havaittava vika voi syntyä led-nauhassa tapahtuvasta oikosulusta. Led-nauhat koostuvat jännitetasosta riippuen useasta sarja- ja rinnankytketystä ketjusta. Mikäli yksi näistä ketjuista menee oikosulkuun, muiden ketjujen jännite nousee, jolloin ne tuottavat enemmän valoa ja tuottavat myös enemmän lämpöä. Tilanteen havaitsemisen tekee erityisen vaikeaksi se, että kokonaisvaloteho ei välttämättä silmämääräisesti muutu. Seurauksena saattaa kuitenkin olla piirilevyn palaminen [67].

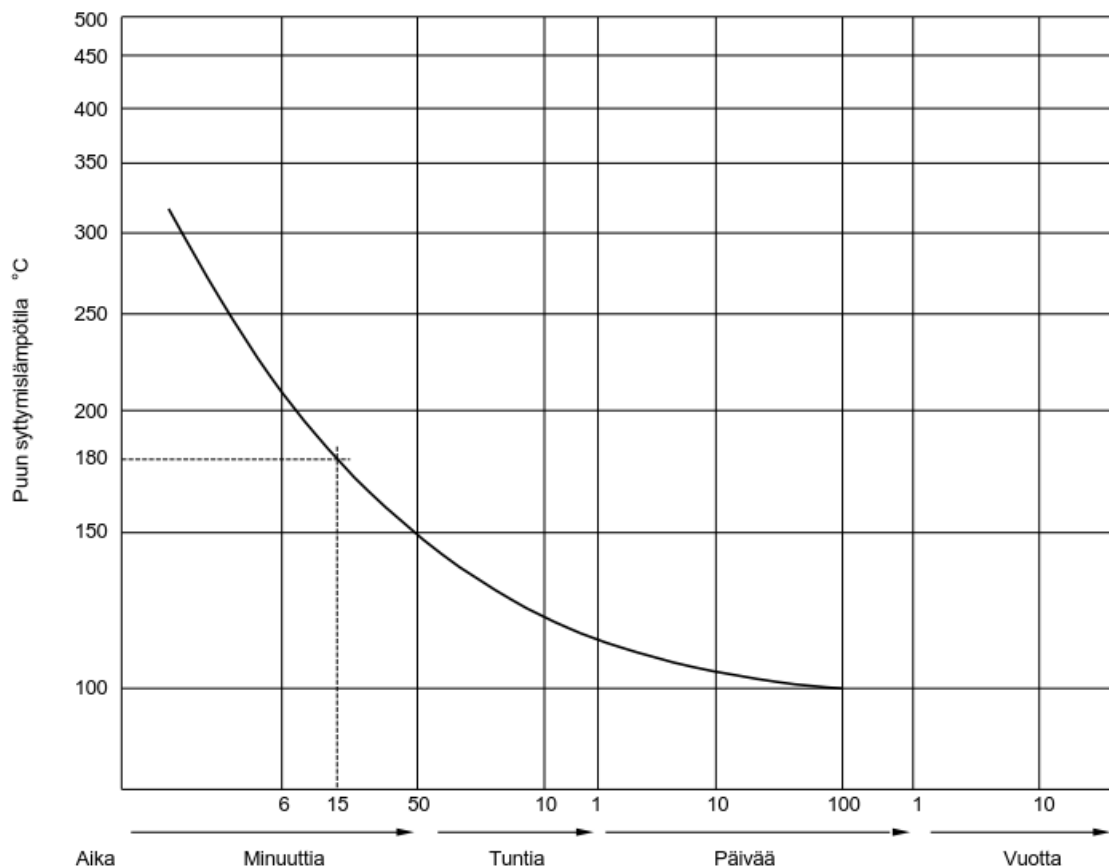
Led-valaistukseen liittyy monia haasteita; lämmönjakautuminen sekä jäähdytystarve poikkeaa suuresti muista valaisinratkaisuista. Led-elementti ei siedä läheskään yhtä suuria lämpöjä kuin hehkulamppu. Led-valaisimen elinikää saadaan pidennettyä merkittävästi, kun lämpö johdetaan lampun rakenteeseen integroituun jäähdytysriipaan. Tämä on kuitenkin ongelma, esimerkiksi uppoasennettavissa led-valaisimissa, sillä ilma ei pääse riittävästi kiertämään rivan ympärillä.

Yleisesti valaistusta pidetään turvallisena ja eikä siihen kiinnitetä huomiota ennen kuin on havaittu vikaantumista. Kuitenkin, pölyn ja lian kertyminen tai valaisimen välkyntä tai valotehon selkeä heikkeneminen voi olla indikaattori palo- tai sähköturvallisuusrisistä. Tutkimuksessa on selvinnyt lukuisia puutteita valaistuksen turvallisuuteen liittyen. Led-nauhat ovat mm. aiheuttaneet teollisuuskiinteistön tulipalon sekä saunaan soveltuva led-valo on aiheuttanut omakotitalon palon asuinkelvottomaksi. Teollisuuskiinteistön palossa oli kuitenkin osasyynä myös virheellinen asennus.

Led valaistuksessa käytetään pientä tasajännitettä, minkä seurauksena valaistusratkaisujen oletetaan olevan aina turvallisia. Matalan jännitetaso vuoksi maallikko saa asentaa monet led-valaisimet. Vaikka valaisimen asentaisi ammattilainen on asennuksessa huomioitava valaistustekniikan erityisvaatimukset paloturvallisuuden näkökulmasta. Matalasta jännitetasosta huolimatta virta voi vikatilanteissa nousta huomattavan suureksi, mikä

aiheuttaa merkittävän sähkö- ja paloturvallisuusriskin. Kotitalouksien normaali sulakesuojaus ei reagoi led-valaisimen vikaan, mikäli vika tapahtuu liitäntälaitteen toisiopuolella. Toimivan ja pitkäikäisen led valaistusjärjestelmän suunnittelu on huomattavasti tarkempaa, kuin muilla valaisintypeillä. Vaikka valaisin olisikin tiettyyn tilaan soveltuva, pitää liitäntälaitteen sijoittamiseen kiinnittää erityshuomiota.

Valaisimesta aiheutuneessa tulipalossa on lähes mahdotonta selvittää, oliko vika valmistajassa, maahantuojassa, asentajassa, kunnossapitäjässä vai käyttäjässä. Nykyisellään led-valaisinten asennusohjeet ovat suuriltaosin riittämättömiä. Asennusohjeiden riittämättömyys yhdistettynä yleiseen virhekäsitykseen ledien lämpenemisestä aiheuttaa haasteen, esim. led-nauha voidaan asentaa paloturvallisuuden kannalta vaarallisesti, mutta kuitenkin täysin asennusohjeiden mukaan. Led-nauhassa on yleensä myös päässä avoimet + ja – navat. On havaittu, että usean valmistajan led-nauhassa ei ole minkäänlaista oikosulkusuoja DC-jännitepuolella. Nauha voidaan asentaa niin, että ajan kuluessa syntyy avoimeen päähän oikosulku, jolloin ilman oikosulkusuoja varustettu virtalähde syöttää nimellisvirtaan nähden moninkertaista virtaa. Asennukset voidaan tehdä suoraan palavan materiaalin, kuten puun pintaan. Herkästi palavan kankaan lähelle asennettuna saattaa harmittomalta vaikuttava nauha olla suuri paloturvallisuusriski. Esimerkkinä alla olevassa kuvassa 41 on esitetty puun syttymislämpötila ajan funktiona.



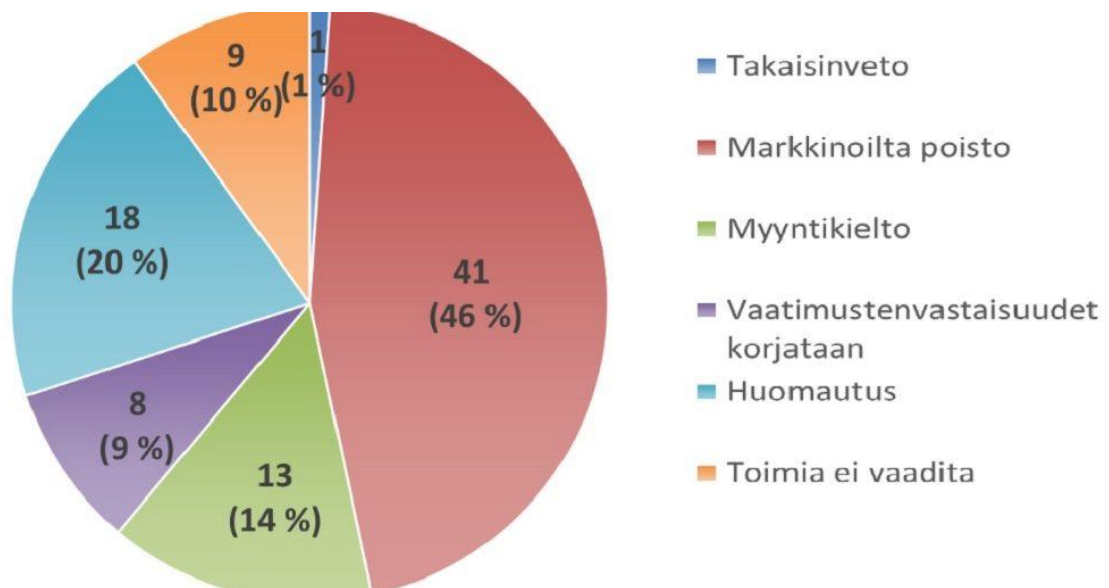
**Kuva 41. Puun syttymislämpötila ajan funktiona [68]**

Aiemmassa kuvassa 40 led-nauha saavutti 100 °C lämpötilan avoimessa, ilmastoidussa tilassa, mikä kuvan 41 mukaan riittäisi puun syttymiseen 100 päivässä. Led-valaistuksen erilaiset asennusmahdollisuudet ahtaisiin ja huonolla ilmankierrolla oleviin paikkoihin yhdistettynä virtalähteiden puutteelliseen suojaukseen luovat mahdollisuudet todellisille paloturvallisuusriskeille. Kuitenkin, laboratoriotutkimuksien perusteella voidaan sanoa, että normaalisti toimiessaan led-valaistus on aina turvallisempi kuin edeltävät valaisinteknologiat. Led-valaistuksen tehölähteratkaisuiden valtava kirjo tuo mukanaan haasteen, sillä kuluttajatuotteissa on mahdoton selvittää, onko tuote turvallinen.

Liitäntälaitteen toteutus on monesti tehty mahdollisimman halvaksi, joten yleensä ledit säilyvätkin ehjinä, mutta liitäntälaitteissa on ilmennyt komponenttivikaa. Led-valaisimissa suurin paloriskin aiheuttaja on ollut nimenomaan liitäntälaitte. Led-valaisinten maahantuojien riittämätön tietämys aiheuttaa myös riskin maallikolle. Maahantuojia ei välttämättä tiedä onko erillinen liitäntälaitte yhteensopiva led-valaisimen kanssa.

## 5.2 Valonlähteiden ja valaisinten vaatimustenmukaisuus

Eurooppalaiset markkinavalvontaviranomaiset ovat selvittäneet led-valonlähteiden turvallisuutta sekä vaatimustenmukaisuutta 17 eri Euroopan maan viranomaisten toimesta. Kuvassa 42 on esitetty viranomaisten testin tulokset [69].



**Kuva 42. Testattujen valaisimien vaatimustenmukaisuus ja jatkotoimenpiteet [69]**

Kaikkiaan testissä oli 82 valaisinta, joista vain kaksi täytti kaikki vaatimukset. Lähes puolet valaisimista jouduttiin poistamaan markkinoilta. Peräti 71 % testatuista valaisimista olivat sellaisilta osin puutteellisia, että niistä voi aiheutua käyttäjän turvallisuudelle vaaraa. Yhdestä tuotteesta puuttui CE-merkintä. Nykyisellään CE-merkintä sekä standardisointi eivät takaa laitteen paloturvallisuutta. CE-merkintä tarkoittaa, että valmistaja va-

kuuttaa tuotteen täyttävän sitä koskevat EU:n direktiivien voimassa olevat turvallisuusvaatimukset. Merkin saaminen ei edellytä puolueetonta testausta. Lisäksi, koska tuotteet tulevat suurelta osin Kiinasta, laitteissa saattaa olla myös Conformité Européenne-merkinnän sijaan China Export-merkinnäksi kutsuttu jäljitelmä. Seuraavassa kuvassa 43 on esitetty näiden kahden merkinnän erot.



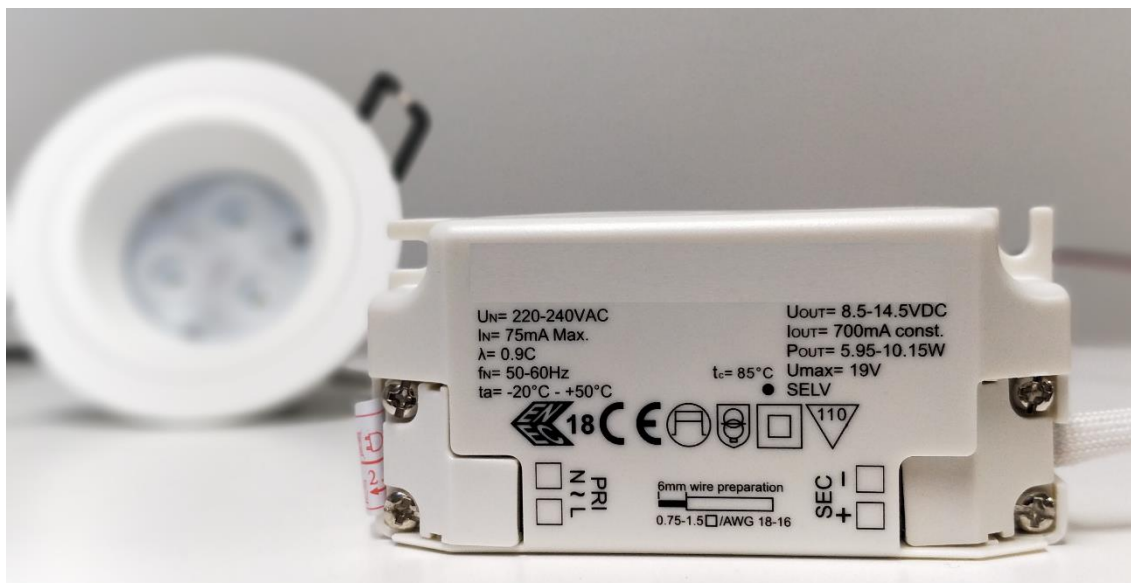
**Kuva 43. Vaatimustenmukaisuus-merkintä ja ns. China Export-merkintä [70]**

Merkit ovat hyvin lähellä toisiaan, eikä eroa välttämättä edes paljaalla silmällä havaitse, vaan siihen voi tarvita matemaattisia apuvälineitä. Tuotteissa saattaa olla kumpi tahansa merkintä ja se saattaa olla vaatimustenmukainen myös China Export-merkinnällä ja tuote ei välttämättä täytä vaatimuksia, vaikka siinä olisi standardin mukainen CE-merkintä. Tuotteiden vaatimustenmukaisuutta on hyvin vaikea todentaa, sillä nykyään ei ole enää kansallisia ennakkotarkastuksia. Tukes ja vastaavat viranomaiset muissa EU-maissa kuitenkin suorittavat pistoluontoista markkinavalvontaa ja raportoi löydöksistä markkinavalvontarekisteriin.

### 5.3 Valonlähteiden ja valaisinten turvallisuuden parantaminen

Tuotteille on myös saatavilla puolueeton, kolmannen osapuolen testausjärjestön vaatimustenmukaisuusmerkintä; European Norms Electrical Certification (ENEC). Kun tuotteesta löytyy ENEC-logo, voidaan varmistua, että tuote täyttää kaikkien jäsenmaiden vaatimukset. Merkin väärentäminen on hankalaa, sillä ENEC pitää rekisteriä kaikista testatuista tuotteista ja loppukäyttäjän on mahdollista tarkastaa rekisteristä, onko merkinnällä varustettu tuote testattu. Seuraavassa kuvassa 44 on esitetty liitäntälaitte, jossa on CE-merkinnän lisäksi ENEC-merkintä.



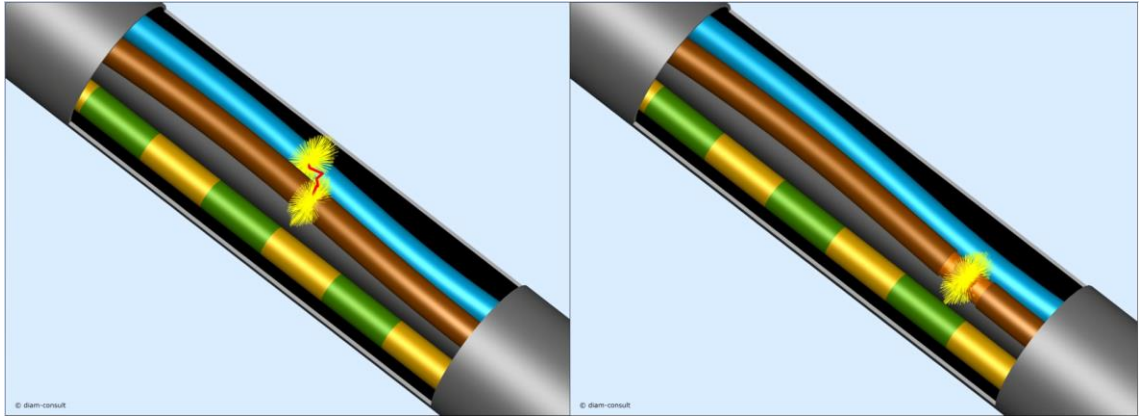


**Kuva 44. Vaatimustenmukainen liitäntälaitte**

ENEC-merkintään kuuluu myös numero ja kyseisessä liitäntälaitteessa numero on 18. Hyväksytyjä testauslaitoksia on ympäri Eurooppaa, jokaisessa jäsenmaassa. Numerolla ilmoitetaan sen laitoksen ID, jossa kyseinen tuote on testattu. Muiden vaatimusten lisäksi liitäntälaitteen on myös varmistettava sähköinen eristys verkkojännitteestä. Tällöin led-moduuleihin, joissa ei ole suojaeristystä voidaan koskea ilman vaaraa sähköiskusta [71].

Valaistuksen paloturvallisuuden kannalta olisi erittäin tärkeää erottaa puhutaanko valaisimen paloturvallisuudesta vai valaistuksen paloturvallisuudesta. Ensimmäisessä puhutaan yksittäisestä laitteesta ja toisessa koko valaisinmassasta. Nykyiset kunnossapidolliset käytännöt keskittyvät vain yksittäiseen laitteeseen, eikä oteta kantaa todelliseen ilmiöön vikaantumisen taustalla. Esimerkiksi jatkuvasti vikaantuvan valaisimen taustalla saattaa olla laajempi ilmiö, josta voi aiheutua suuria palo- ja sähköturvallisuusrikejä.

Paloturvallisuutta voidaan parantaa vaatimalla käytetyille valaisimille ulkoisen testauslaitoksen hyväksyntää, tekemällä säännöllistä valaistushuoltoa sekä tarkastelemalla, onko nykyisessä valaistusjärjestelmässä tarvetta lisäsuojaukselle, kuten uudentyyppiselle valokaarisuojaukselle. Valokaarisuojauksella voidaan havaita rinnakkainen kipinäointi vaiheen ja nollan välillä sekä sarjakipinäointi yhdessä johtimessa, kuten kuvassa 45 on esitetty.



**Kuva 45. Valokaarisuojalla havaittavat viat [23]**

Yleisimpiä syitä kipinöinnille ovat:

- Johtimien joutuminen puristuksiin
- Eristeviat, esim. naula
- Asennuksien ikääntyminen
- UV-säteilyn aiheuttamat eristeiden haurastumiset, esim. loistevalaisimessa
- Löysät liitokset mm. tärinän johdosta

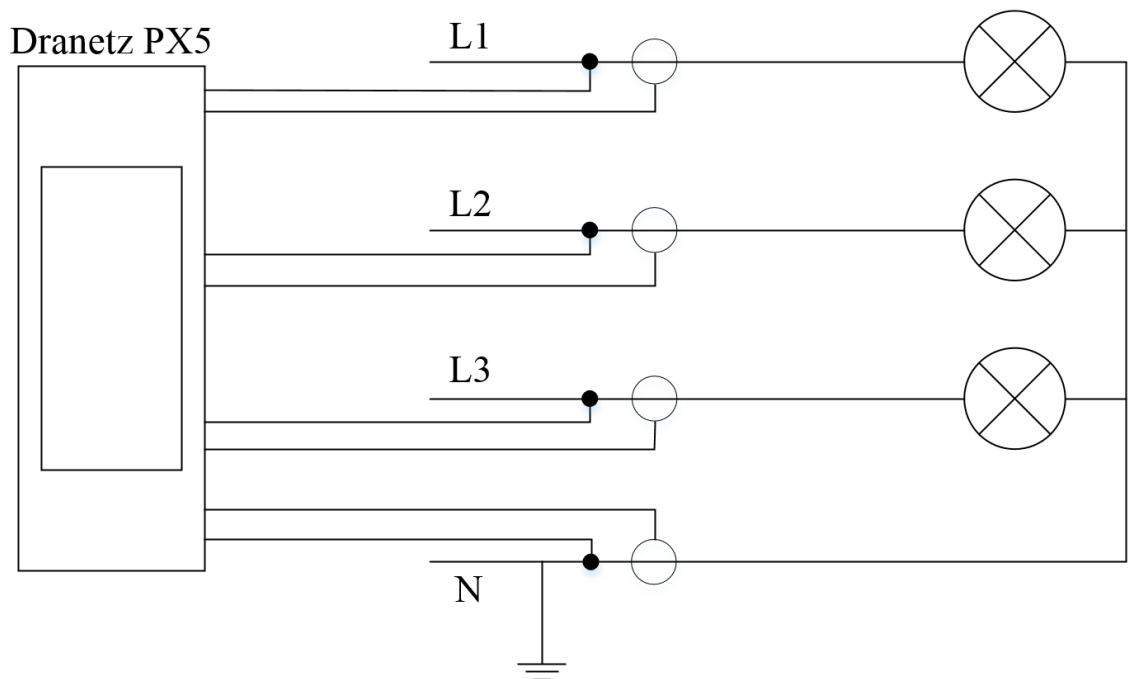
Led-valaistuksen mukana tuomat huoltosäästöt mahdollistavat uudenlaiset turvallisuusriskit. Led-valaisimille luvataan hyvin pitkää käyttöikää, jolloin säännöllisen huollon tarve korostuu. Kun vanha valaisin toimi rajoitetumman ajan, tuli valaisimen valonlähteen vaihdon yhteydessä vähintään silmämääräinen tarkastus valaisimien ja johtimien kunnosta huoltomiehen toimesta. Koska led-valaistuksella huoltoväli pitenee, kunnonvalvonnan merkitys korostuu valaistuksen huoltojen välissä. Valaistuksen turvallisuuden takaamiseksi on tarvetta säännölliselle huolto-/kunnossapitosuunnitelmalle sekä tarkennetuille asennusohjeille.

Mikäli led-valaistusta syöttävissä ryhmäjohdoissa käytetään automaattisulaketta, tulee sulakkeiden mitoituksessa huomioida hyvin suuri kytkentätransientti. Transientin aiheuttaa liitäntälaitteen verkkosuotimen kondensaattorit. Aiheutuneen virtapiikin suuruus ei siis riipu valaisimen tehosta vaan liitäntälaitteen rakenteesta. Osa valaisinvalmistajista ilmoittaa, kuinka monta heidän tuotetta voidaan liittää erityyppisiin johdonsuojakatkaisijoihin. Virtapiikin vuoksi esimerkiksi Fagerhult suosittelee käytettäväksi C-tyyppin laukaisukäyrän johdonsuojakatkaisijoita [33]. Valaistussaneerauksessa valaistustekniikan muutoksen yhteydessä tulee tarkastella suojauksen toimivuus ja liitettävien valaisimien määrä yhden suojan perään. Vaihdettaessa vain valaisimet, liitettävien valaisinten maksimimäärä voi olla pienempi kuin vanhalla tekniikalla tai suojaustyyppiä voidaan joutua muuttamaan. Esimerkiksi käytettäessä B-tyyppin 16 A sulaketta, ryhmäkoko pienenee noin 50 %. Suurilla valaisinvalmistajilla on myös tarjolla ns. pehmökäynnistimiä valaisinlähtiin.

## 6. KENTTÄTUTKIMUKSET

Kenttätutkimuksissa tutkittiin erilaisten valaisinratkaisuiden vaikutusta sähkönlaatuun. Kenttämittaukset suoritettiin erilaisissa kiinteistöissä, joissa suoritettiin valaistussaneeraus. Vaihdettaessa valaisintekniikkaa elektronisella liitäntälaitteella varustettuun tekniikkaan, tulee varmistua valaisinratkaisuiden sopivuudesta sähköverkkoon sekä nollajohtimen mitoituksen riittävydestä. Esimerkiksi vanhoissa rakennuksissa nollajohdin voi olla vain puolet vaihejohtimien poikkipinta-alasta. Nollajohtimen mitoituksessa tulee ottaa huomioon johtimen kuormitettavuus sekä sen vaikutus kaapelin lämpenemiselle. Nollajohtimen virtaan vaikuttaa vaiheiden kuormitusten suuruus ja tyyppi.

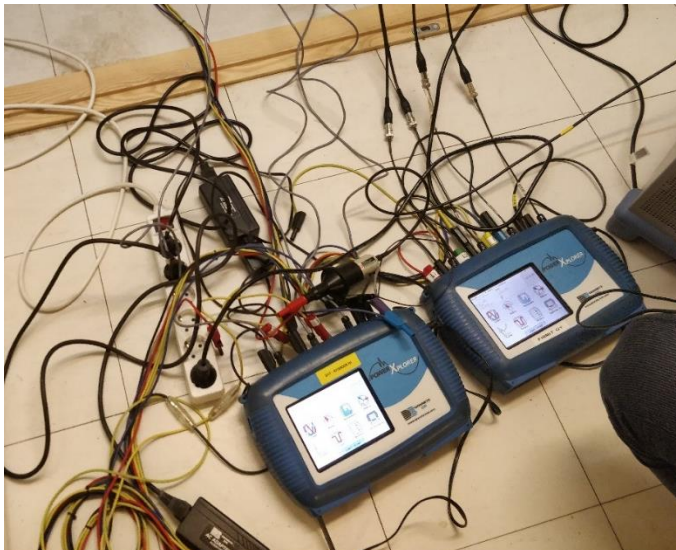
Nollajohtimen poikkipinta-ala voi olla vaihejohdinta pienempi, mikäli piirissä kulkeva virta on tasapainossa, kolmannen yliaallon ja sen parittomien kerrannaisten tehollisarvojen osuus on enintään 15 % vaihejohtimen virrasta, nollajohdin on ylivirtasuojattu tai nollajohdin on vähintään 16 mm<sup>2</sup> Cu tai 25 mm<sup>2</sup> Al [35, 72]. Alla olevassa kuvassa 46 on esitetty periaatekuva kenttämittausten mittausjärjestelyistä.



**Kuva 46. Mittausjärjestelyt kenttätutkimuksissa**

Dranetz PX5 on sähkön laadun analysointiin tarkoitettu mittalaite. Sillä voidaan tehdä hyvin monimuotoisia mittauksia sekä pitkäaikaista monitorointia sähkön laadun osalta. Kenttämittauksissa kuitenkin keskityttiin lähinnä aaltomuotojen tallentamiseen erilaisissa tilanteissa. Tuloksia käsiteltiin Dran-View 7-sovelluksella. Ohjelmalla voidaan laskea lähes kaikki sähkönlaatuun liittyvät suureet. Laskennat ja mittaukset on myös mahdollista

toteuttaa suoraan sähkön laatuun liittyvien standardien avulla, jolloin ohjelma kertoo, täyttyykö standardin määräykset. Mittaustuloksissa THD arvot on laskettu 40. järjestyslukuun saakka. Alla olevassa kuvassa 47 on esitetty kenttämittauskohteissa käytetyt mittalaitteet.

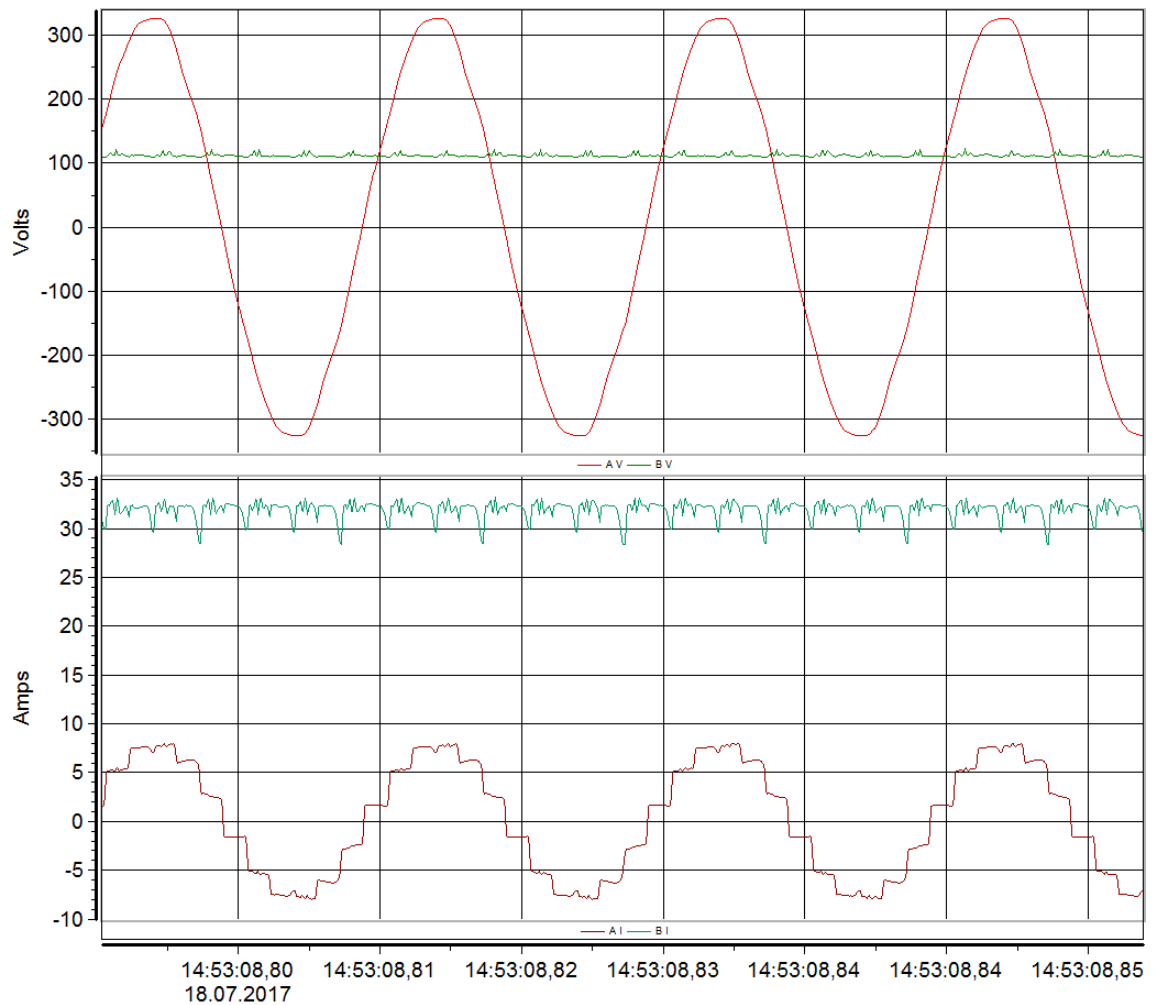


**Kuva 47. Kenttämittauksissa käytetyt mittalaitteet**

Valaistussaneerauskohteissa mittauksiin valittiin pelkkää valaistuskuormaa sisältävä kolmivaihelähtö sekä kyseisen lähdön yhteinen nollajohdin. Ensimmäisellä mittauskerralla valittiin mittaukseen soveltuvat lähdöt ja samoja lähtöjä mitattiin myös saneerauksen jälkeen. Tällöin saadaan vertailukelpoista dataa kuormituksen ja särötasojen muutoksesta. Mittauskohteet 1 ja 5 kuitenkin olivat poikkeuksia ja näissä mittausperiaate oli sama, mutta kohteissa ei tehty ennen-jälkeen mittauksia, kuten varsinaisissa saneerauskohteissa.

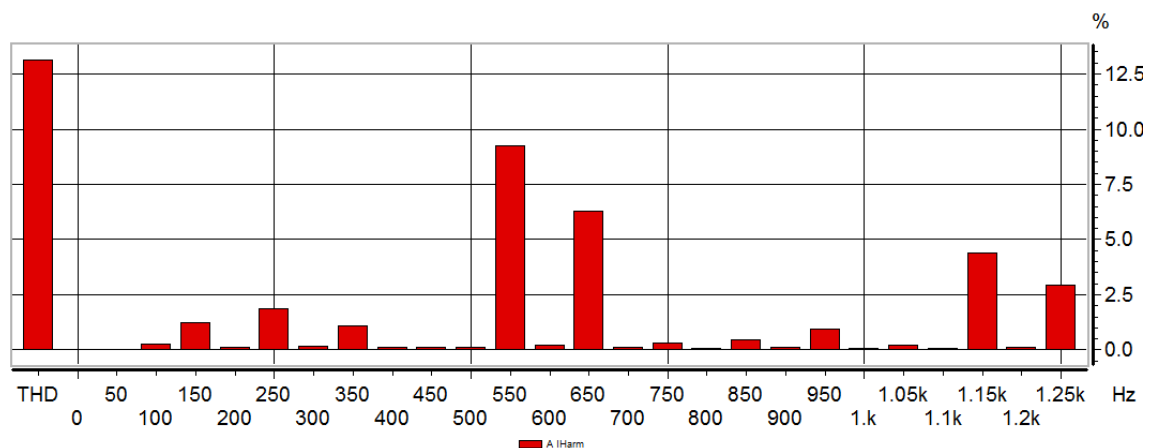
## 6.1 Mittauskohde 1, Ylöjärvi

Tässä mittauskohteessa tutkittiin keskitetyn valaistusratkaisun vaikutuksia sähkönlaatuun. Keskitetyllä ratkaisulla tarkoitetaan, että jokaisella valaisimella ei ole erillistä liitäntälaitetta. Käyrämuodot on esitetty kuvassa 48 ja siitä voidaan havaita, että ratkaisussa on hyödynnetty 12-pulssisiltaa tasasuuntauksessa. Tällöin voidaan soveltaa vanhaa keskusta ja asentaa tasasuuntaaja keskuksen yhteyteen. 12-pulssinen tasasuuntaus tarkoittaa, että kaksi perinteistä 6-pulssista diodisiltaa on kytketty rinnan käyttäen syöttömuuntajaa, jossa on kaksi toisiota. Näistä toinen on kytketty kolmiokytkennällä ja toinen tähtikytkennällä. Tästä johtuvan 30° vaihesiirron takia, verkkovirrasta eliminoiduu 5. ja 7. yliaalto. Keskitetyllä ratkaisulla voidaan hyödyntää myös olemassa olevaa kaapelointia. Keskitetyn ratkaisun eduksi voidaan mainita myös se, että menetelmällä ei synny kolmatta yliaaltoa käytännössä lainkaan. Ratkaisu on kuitenkin hankintahinnaltaan kalliimpi kuin hajautettu led-valaistusratkaisu.



**Kuva 48. AC jännite ja virta (punainen), DC jännite ja virta (vihreä)**

Alla olevassa kuvassa 49 on esitetty verkkovirran THD sekä yliaaltojakauma. Koska käytössä on 12-pulssisilta, 5. ja 7. yliaalto kumoutuu pois ja ensimmäiset merkittävät yliaallot ovat 11. sekä 13. Tämä voidaan havaita virran käyrämuodosta sekä yliaaltojakaumasta.



**Kuva 49. Verkkovirran yliaaltojakauma**

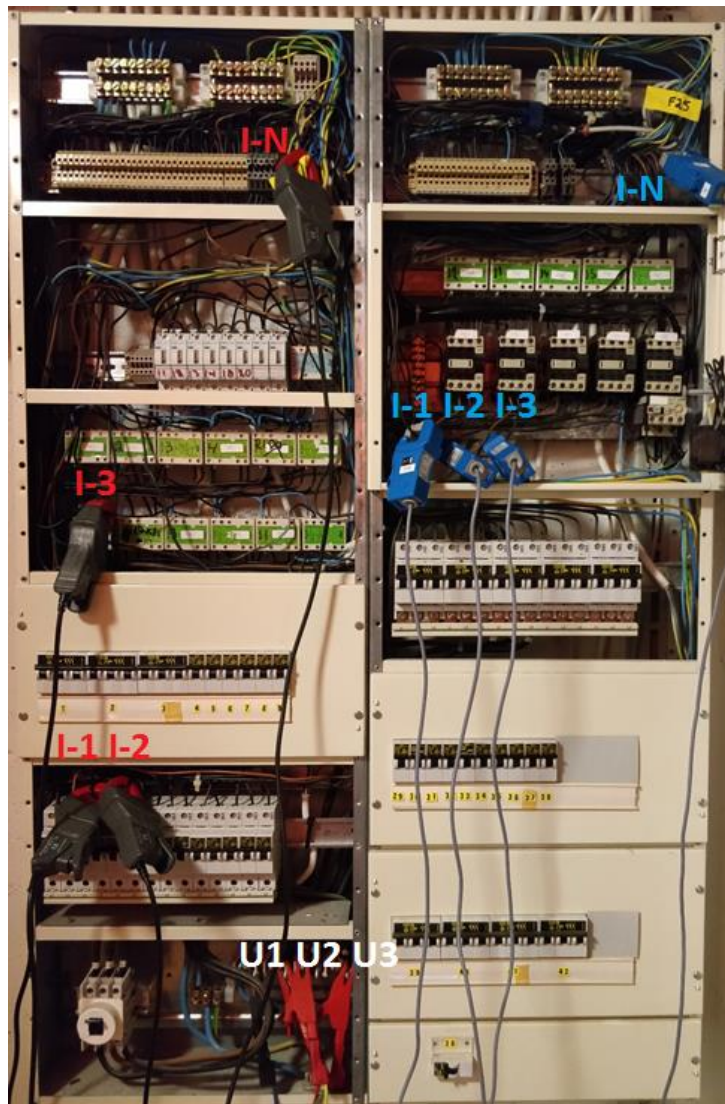


Virran THD sekä yliaaltojakauma kuvaavat virrassa esiintyviä yliaaltokomponentteja ja niiden prosenttiosuuksia perusaallosta (50 Hz). Verkkovirran THD on n. 13 % perustajuisesta virrasta laskettuna 2000 Hz eli 40. järjestyslukuun asti.

## 6.2 Mittauskohde 2, Kouvola

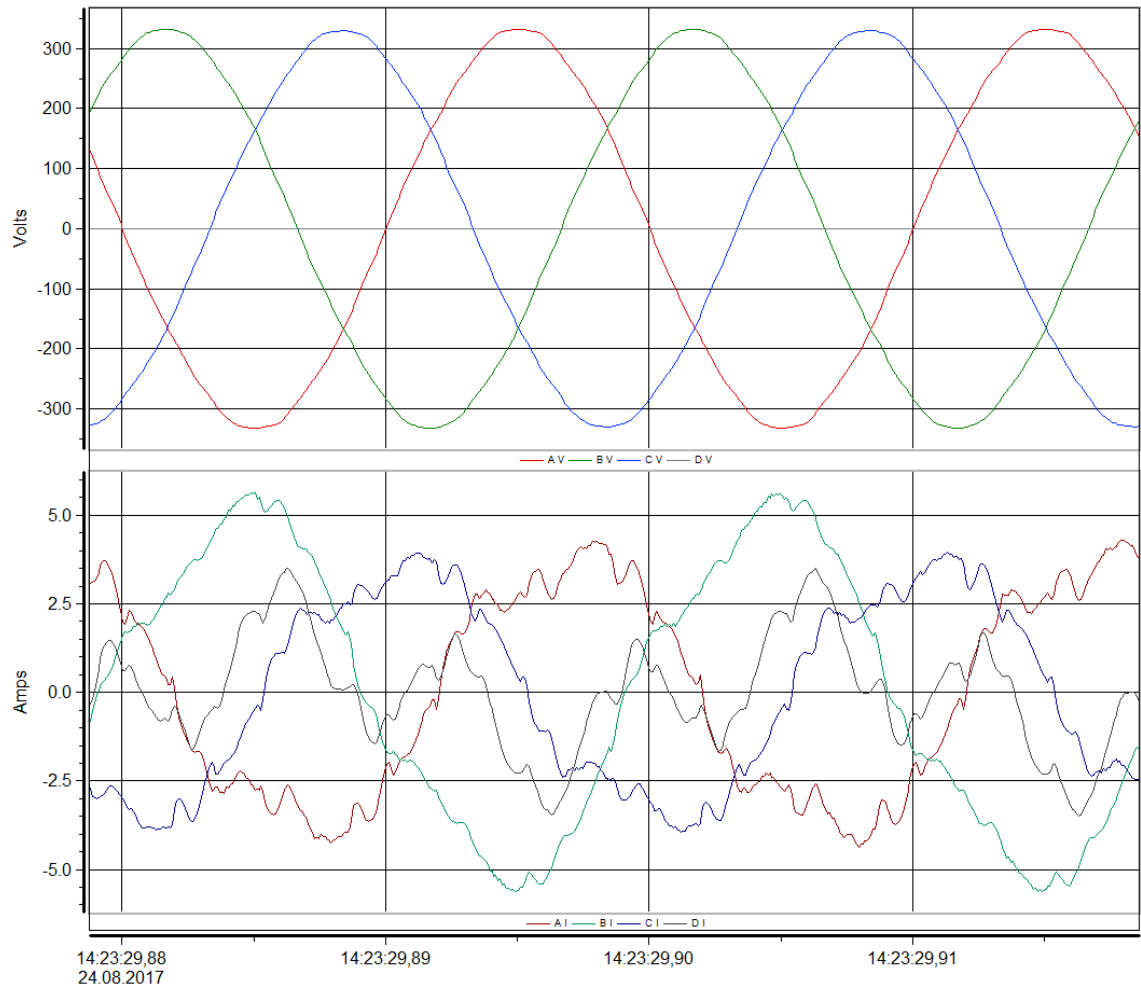
Mittauskohteena oli kirjasto, jonka valaistus saneerattiin. Tutkimuskohteena oli monimettallivalaisimia sekä loistevalaisimia. Molemmista valaisintyypeistä mitattiin kolmivaiheista ryhmää sekä ryhmän nollajohdinta.

Mittauksissa käytettiin kahta Dranetz PX5-sähkönlaatuanalysaattoria. Mittapääät kytkettiin keskuksen pääkiskoon, josta mitattiin syöttävä jännite. Virranmittauspihteinä käytettiin Fluken i200s-virtapihtejä sekä Dranetz TR2510B-virtapihtejä. Virtapihdit kytkettiin jokaisen vaiheen (L1, L2, L3) sekä ryhmää vastaavan nollajohdon (N) ympärille. Kuvia mittauskytkennöistä on esitetty alla olevassa kuvassa 50.



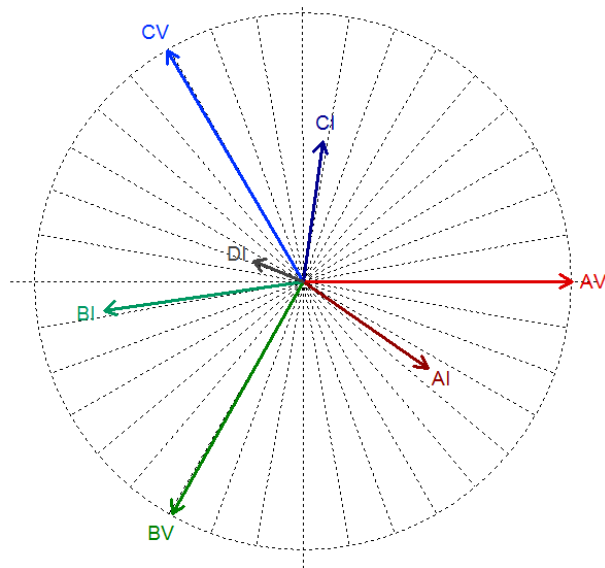
*Kuva 50. Mittauskytkentä, Kouvola*

Aaltomuotokuvissa on esitetty kolmivaiheisen lähdön jännitteet sekä virrat, mukaan lukien nollavirta. Osoitinesityksillä puolestaan pyritään havainnollistamaan vaihe-kulmia sekä niiden eroja valaisinratkaisujen välillä. Virran THD raja riippuu verkon jäykkyydestä ts. maksimioikosulkuvirran suuruudesta. Loistevalaisinryhmän aaltomuodot on esitetty kuvassa 51.



**Kuva 51. Aaltomuodot, loistevalaisinryhmä**

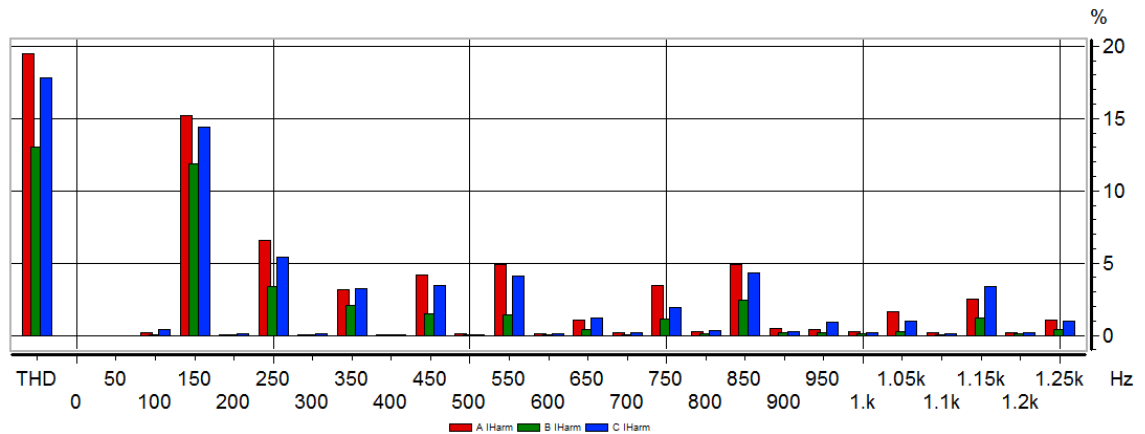
Loistevalaisimet, joissa on magneettinen kuristin, ovat induktiivisia kuormia. Tällöin virta on jännitettä jäljessä. Induktiivista kuormaa on kompensoitu loistevalaisimissa kondensaattoreilla. Seuraavassa kuvassa 52 on esitetty vaihevirrat ja jännitteet osoitinmuodossa.



**Kuva 52. Osoitinesitys loistevalaisinryhmästä**

Kuten kuvasta huomataan, kyseessä on magneettikuristimilla varustettu loistevalaisinryhmä. Virta on tällöin jännitettä noin  $35^\circ$  jäljessä. Kuorma ei ole kuitenkaan puhtaasti induktiivinen, vaan kompensointikondensaattorit pienentävät vaihe-eroa ja parantavat tehokerrointa. Nollavirran amplitudi on n. 85 % vaihevirran amplitudista.

Seuraavassa kuvassa 53 on esitetty loistevalaisinlähden virran yliaaltojakauma. Jokaisessa vaihevirrassa on havaittavissa n. 15 % perusaallosta, 150 Hz taajuisista yliaaltovirtaa. THD on loistevalaisinryhmällä 20 %, kun edellä se oli vain 13 %.

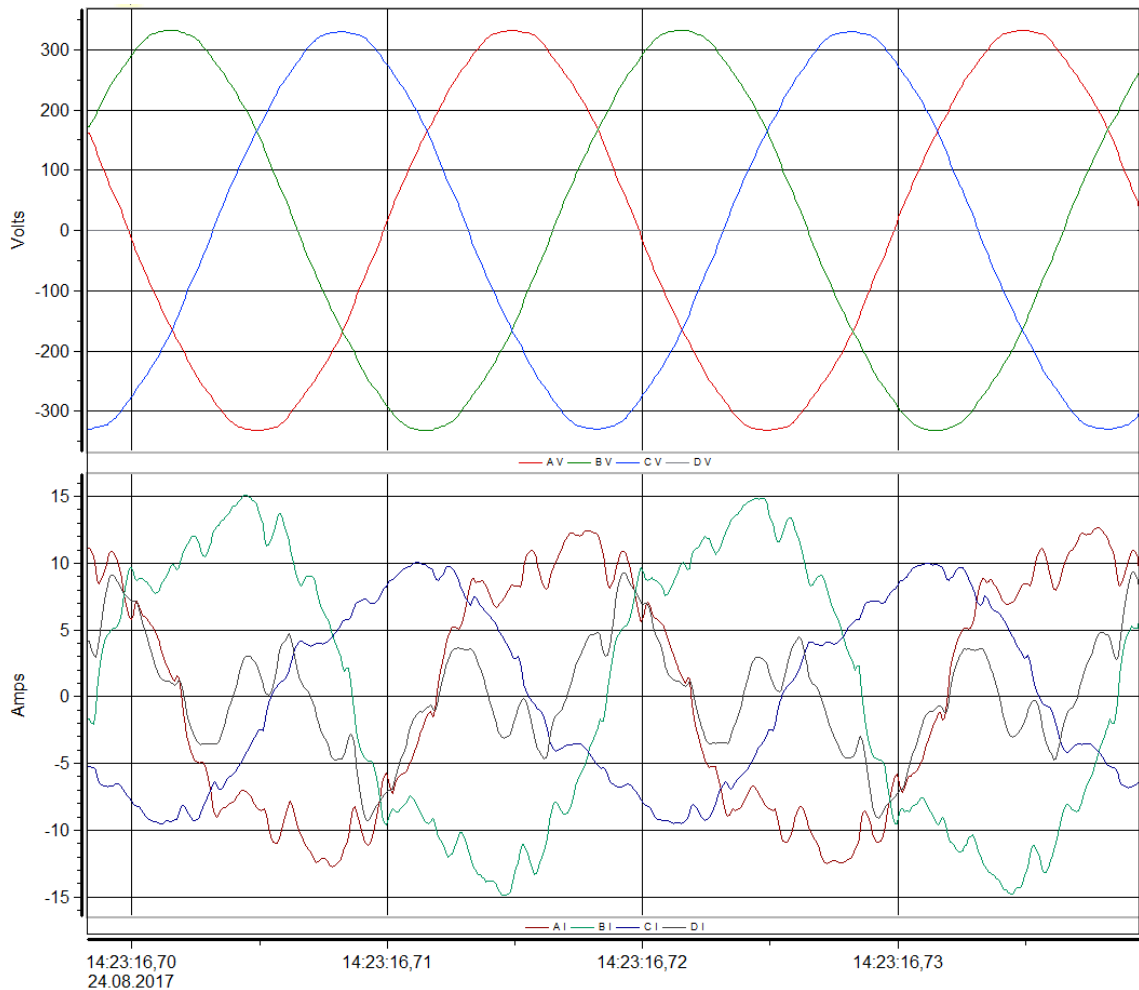


**Kuva 53. Virran THD ja yliaaltojakauma, Loistevalaisinryhmä**

Yliaaltojakaumassa on havaittavissa paljon kolmatta, mutta myös korkeampia (5., 7., 9., ja 11.) parittomia kerrannaisia. Esimerkiksi tässä tapauksessa, yliaallot vaikuttavat nollajohtimen mitoitukseen. Yliaaltopitoisuus on myös saattanut muuttua valaisinten ikääntymisen myötä. Kompensointikondensaattorien kapasitanssin muutos vaikuttaa kokonaisvirtaan. Kondensaattoreilla on valaisimissa myös häiriönpoisto-ominaisuuksia, joten nämäkin ominaisuudet heikkenevät kondensaattorien ikääntymisen myötä [73].

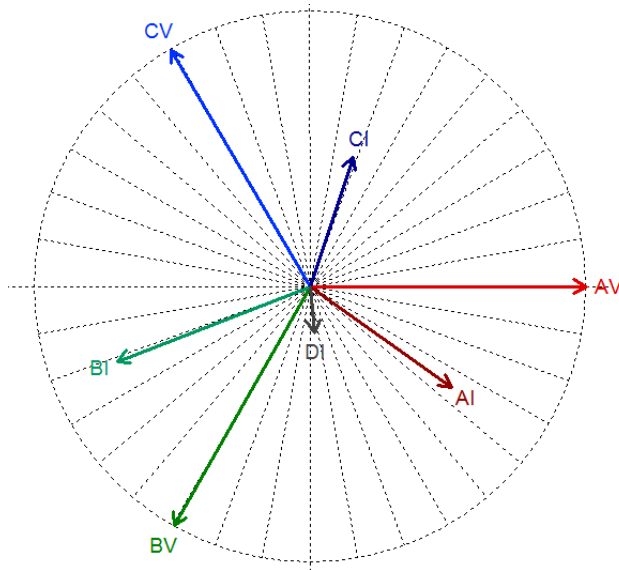


Kohteessa vaihdettiin käytännössä kaikki valaisimet led-tekniikkaa hyödyntäviksi. Lisäksi vanha valaistus koostui kahdesta eri tekniikasta, loistevalaisimista sekä monimetallivalaisimista. Mittauksissa tutkittiin molempien lähtöjen muutoksia. Seuraavassa kuvassa 54 on esitetty monimetallivalaisinryhmän aaltomuodot.



**Kuva 54. Aaltomuodot, monimetallivalaisinryhmä**

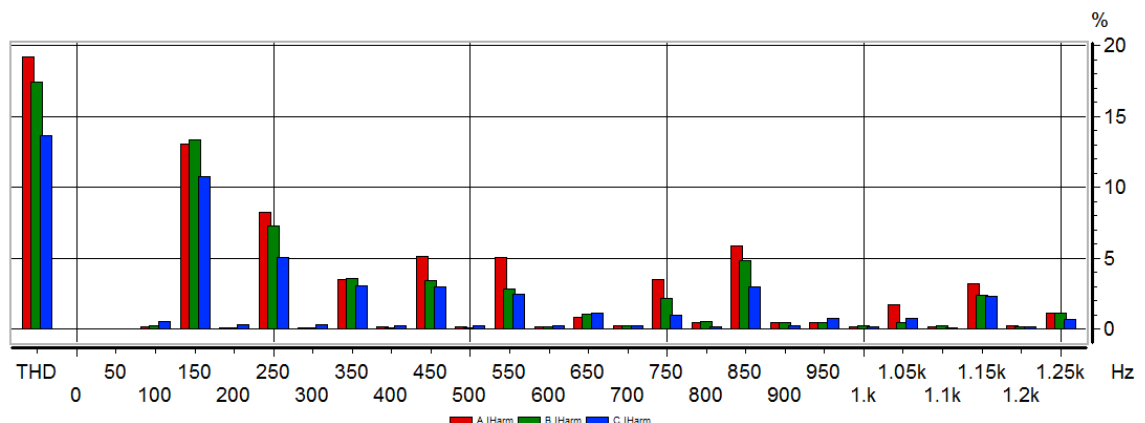
Kuormitus on kohtalaisen symmetrinen, mutta nollavirrassa on paljon 150 Hz taajuutta. Lisäksi nollavirrassa on myös korkeataajuisempia komponentteja. Nollavirran tehollisarvo on n. 4 A ja amplitudi on n. 75 % vaihevirran amplitudista. Myös loistevalaisinryhmässä nollavirran amplitudi on lähes vaihevirran amplitudin suuruinen. Vaihe-eroa voidaan tarkastella aaltomuotokuvista, mutta havainnointi on huomattavasti helpompaa osoitinympyrän avulla. Seuraavassa kuvassa 55 on esitetty monimetallivalaisinryhmän osoitinympyrä.



**Kuva 55. Osoitinesitys monimetallivalaisinryhmästä**

Osoitinympyrästä ja aaltomuodoista voidaan havaita, että myös monimetallivalaisimet ovat vahvasti induktiivisia kuormia. Nollavirran vektori (DI) on osoitinympyrässä hyvin pieni vaihevirtoihin nähden, joten kuormitus on lähes symmetrinen. Osoitinympyrä kertoo kuitenkin vain perustaajuuden kuormituksen vaihe-eron. Vaihe-ero on n. 35° kuten loisteputkillakin (AI ja AV).

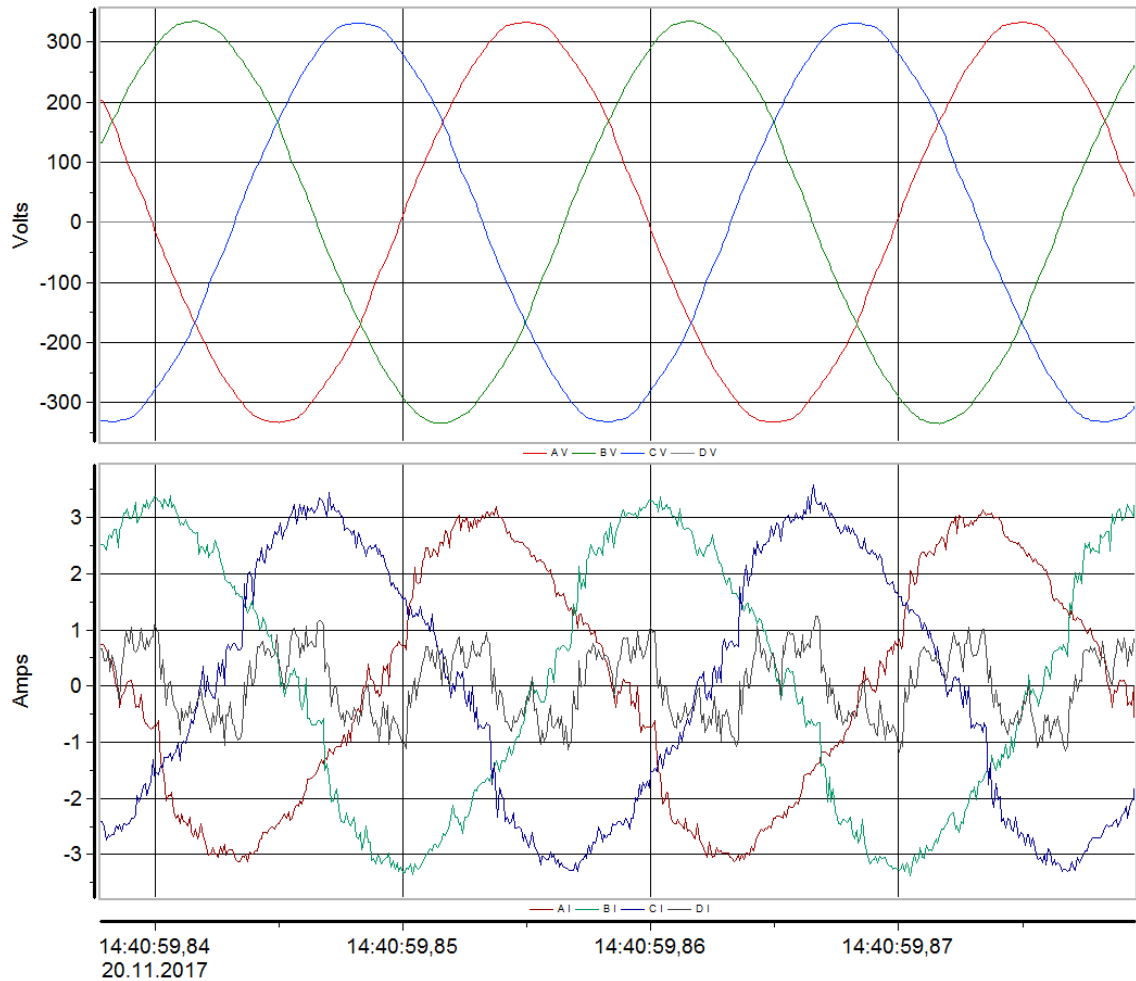
Kuvassa 56 on esitetty monimetallivalaisinryhmän virran yliaaltojakauma. Yliaaltojakaumasta havaitaan, että virrassa on lähes 15 % 150 Hz taajuuskomponenttia, mutta merkittävä määrä myös korkeampien taajuuksien komponentteja. Monimetallivalaisimien kokonaissärö on samaa luokkaa kuin loisteputkillakin.



**Kuva 56. Virran THD ja yliaaltojakauma, Monimetallivalaisinryhmä**

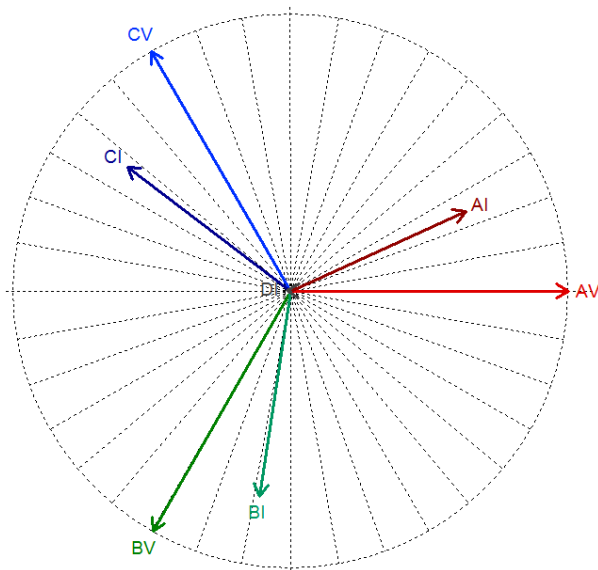
Monimetallivalaisinten tilalle vaihdettiin led-valaisimet, eli valaisimessa on integroituna liitäntälaite sekä itse valonlähde. Kuten virran aaltomuodosta kuvassa 57 voidaan havaita, virta noudattaa jo hyvin lähelle haluttua siniaaltoa, sekä vaihe-ero virran ja jännitteen välillä on hyvin pieni. Laadukkaammissa led-valaisimissa, kuten näissä, on yleisesti tehokertoimen korjauspiiri, jolla tehokerroin saadaan lähelle yhtä. Alle 25 W led-

valaisimissa PFC-piiriä ei kuitenkaan vaadita. Kun PFC-piiri on käytössä, virran aaltomuoto noudattaa jännitteen jaksoa. Tällöin yliaaltopitoisuudet jäävät pienemmiksi kuin lampulla, jossa tehokerrointa ei pyritä korjaamaan. Led-valaisimet näkyvät verkon kanalta yleensä kapasitiivisina kuormina, jolloin virta on jännitettä edellä [74].



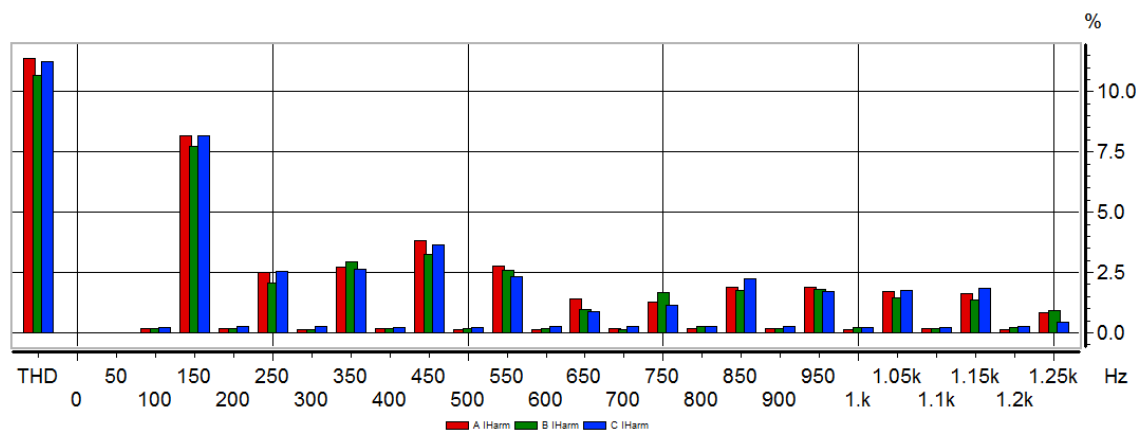
**Kuva 57. Aaltomuodot, Uudet led-valaisimet**

Aaltomuodosta voidaan selvästi nähdä liitäntälaitteen korkea kytkentätaajuus, joka näkyy pienenä ”värähtelynä” verkkotaajuudella vaihtelevassa virtojen käyrämuodoissa. Osoitinympyrä on esitetty kuvassa 58 ja siitä voidaan havaita, että kuormitus on symmetrinen ja nollavirta on lähes 0. Virran ja jännitteen vaihe-ero on kapasitiivista, mutta vaihekulma on melko pieni, n.  $25^\circ$ . Nollavirran amplitudi on n. 28 % vaihevirran amplitudista



**Kuva 58. Osoitinesitys, Uudet led-valaisimet**

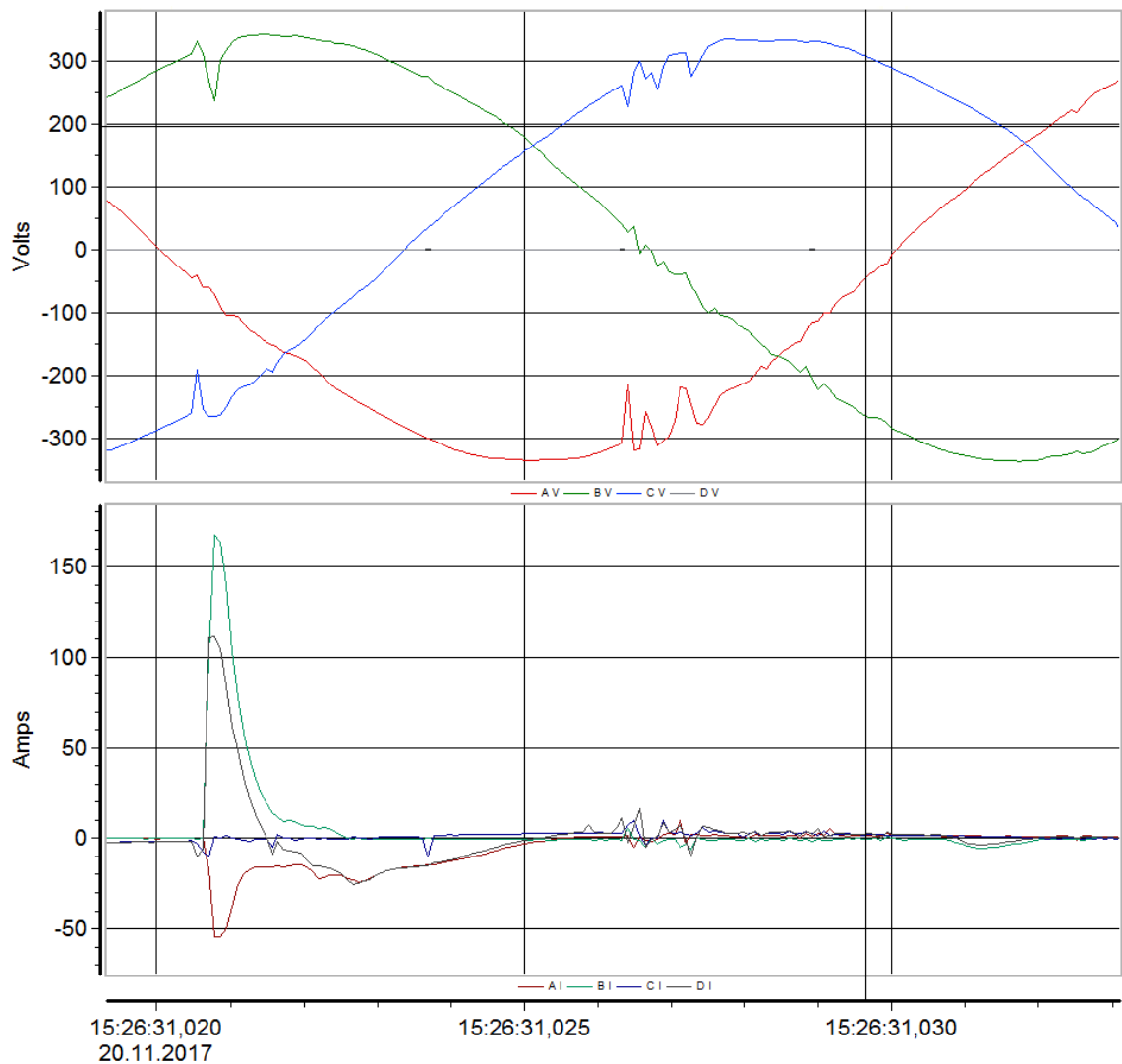
Alla olevassa kuvassa 59 on esitetty led-valaisinryhmän virran yliaaltojakauma. Kuvassa 59 korostuu 150 Hz taajuus, mutta prosentuaalinen osuus on kuitenkin melko pieni verrattuna loistevalaisimiin magneettikuristimella sekä myös valaisinlähtöihin, joissa loisteputkien tilalle on vaihdettu vain led-putki.



**Kuva 59. Virran THD ja yliaaltojakauma, Uudet led-valaisimet**

Yliaaltojakaumassa on korkeitakin taajuuksia jonkin verran, mikä voidaan nähdä myös virtakuvaajasta. Perusaaltoisessa virrassa on havaittavissa myös korkeataajuisia värähtelyä. Uusilla led-valaisimilla THD on samaa suuruusluokkaa Ylöjärven mittauskohteen kanssa. Kolmannen yliaallon pitoisuus on kuitenkin varsin suuri, n. 8 %. Kokonaissärökertoimen kannalta keskitetty led-valaisinratkaisu vastaa hajautettua led-valaisinratkaisua. Keskitetyssä ei kuitenkaan ole laisinkaan nollavirtaa. Keskitetyn ratkaisun huolto on helpompaa, kuin hajautetun [74].

Kuvassa 60 on esitetty uusien led-valaisimien aiheuttama kytkentätransientti. Virtapiikki on huomattavan suuri, jopa 170 ampeeria.

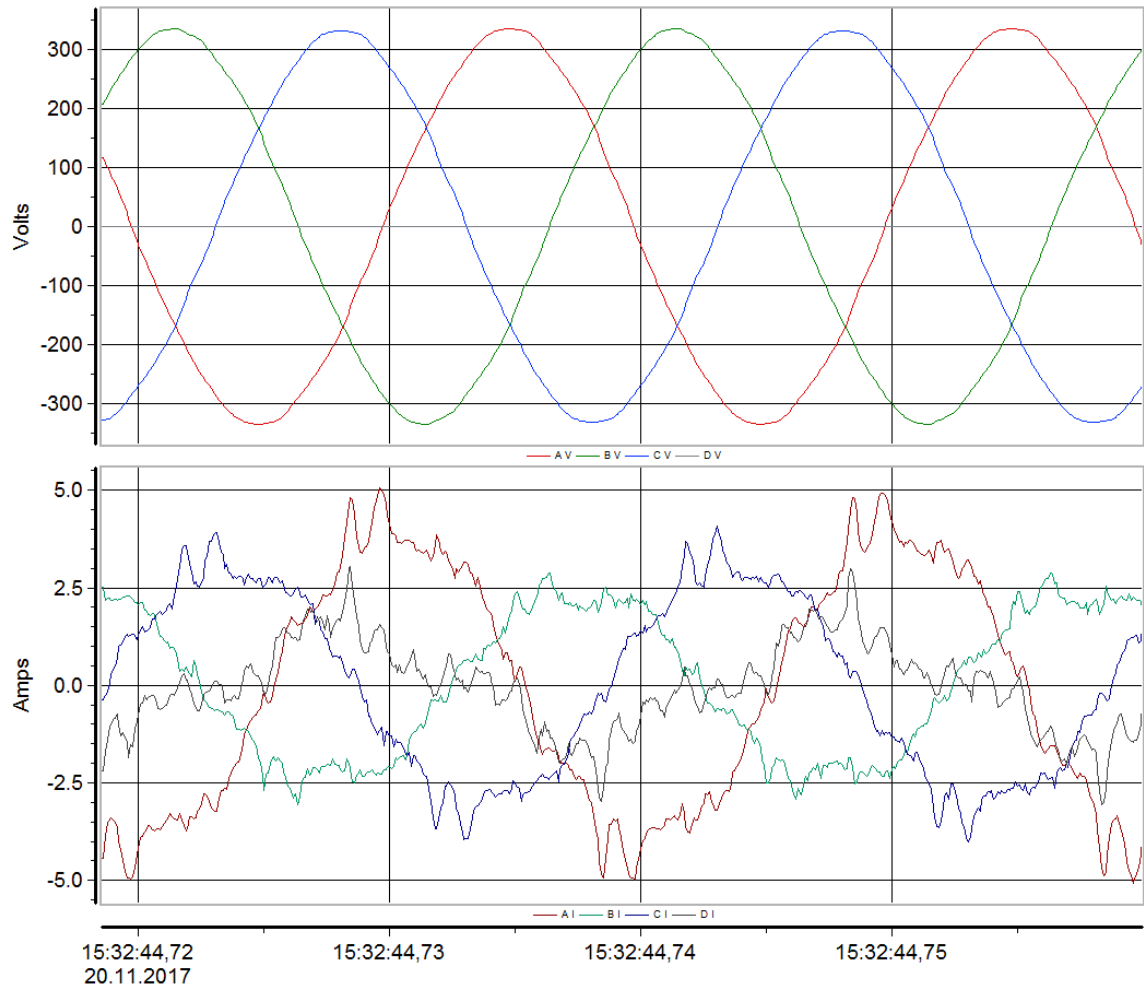


**Kuva 60. Uudet led-valaisimet, kytkentävirtasysäys**

Jännitteen käyrämuodossa voidaan havaita jännitteen notkahduksia. Vastaavia ongelmia aiheutuu myös kompensointiparistojen epäsynkronisesta verkkoon kytkennästä. Vaiheen L2 (kuvassa BV, vihreä) voidaan havaita värähtelyä nollanylityksessä. Värähtely johtuu todennäköisesti muualla verkossa tapahtuvasta kompensoinnin kytkennästä, mutta voisi johtua valaistuksen kytkennästäkin, mikäli kytkentä osuisi samaan ajanhetkeen. Tämänkaltaisesta värähtelystä voi aiheutua ongelmia yksinkertaisinta vaiheenlukitussilmukkaa (PLL) hyödyntävissä laitteissa. Kyseinen tekniikka voi olla käytössä esimerkiksi ohjatuissa tasasuuntaajissa. Lisäksi parilliset yliaallot voivat aiheuttaa tasasuuntaajien rikkoutumisia tai muita vikatilanteita [24, 75].

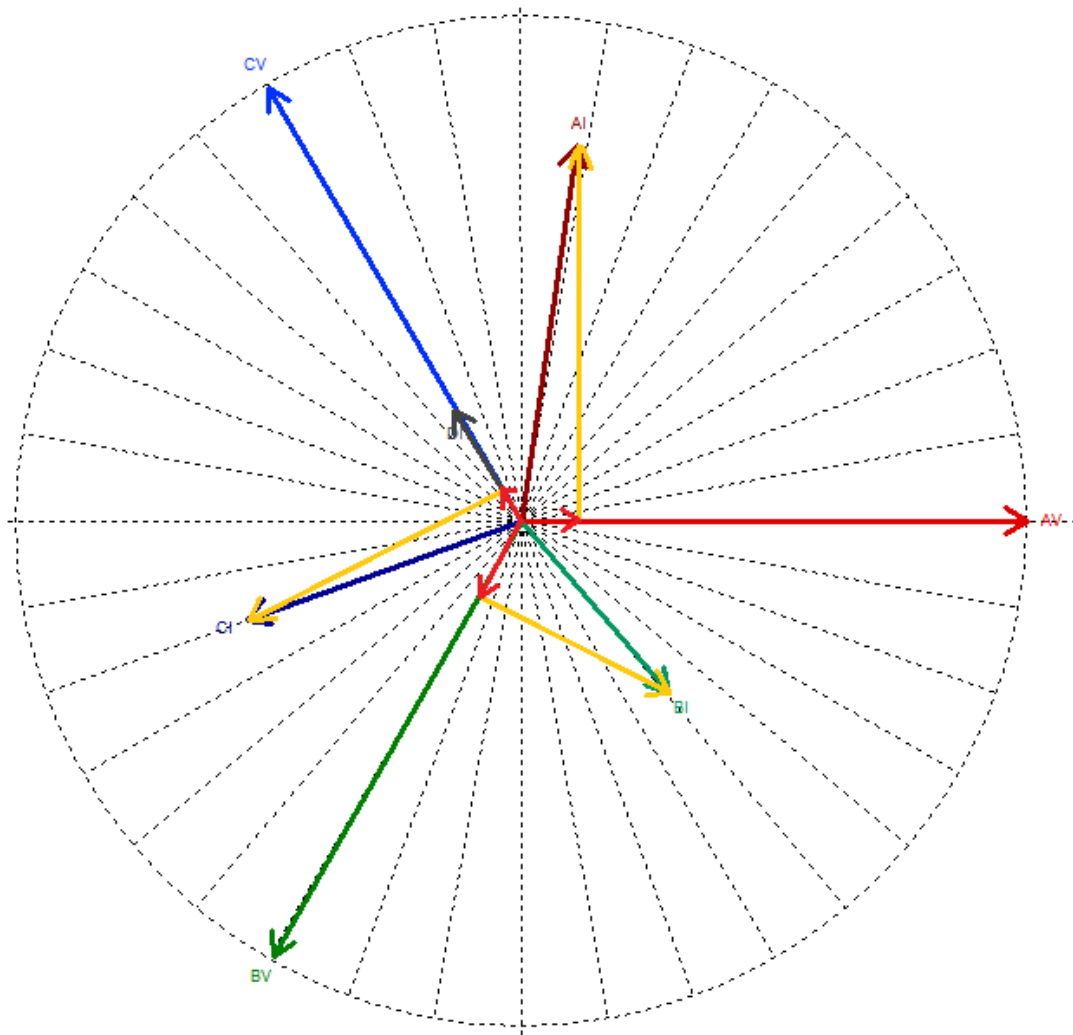
Seuraavassa kuvassa 61 on esitetty aaltomuodot tapauksessa, jossa loistevalaisinrunkoihin vaihdettiin led-putket. Valaisimissa on huono, mahdollisesti tilanpuutteesta johtuva syötönpuoleinen suodatus. Lisäksi valaisinrunkoihin oli jätetty vanhoille loisteputkille tarkoitetut magneettikuristin ja kompensointikondensaattorit. Kuristimesta aiheutuu turhia tehohäviöitä. Kondensaattorit ovat mitoitettu vanhan induktiivisen kuorman mukaan,

joten uusilla led-putkilla kuormitus on lähes kapasitiivinen. Tämä voidaan havaita myös kuvasta 61, jossa virta on lähes  $90^\circ$  jännitettä edellä. Kondensaattorien ja kuristimen vaikutuksesta valaisin lähdön virran huippuarvo pysyy lähes muuttumattomana. Tällöin led-valaistuksella tavoitellut energiasäästöt eivät toteudu. Nollavirran amplitudi on n. 75 % vaihevirran amplitudista.



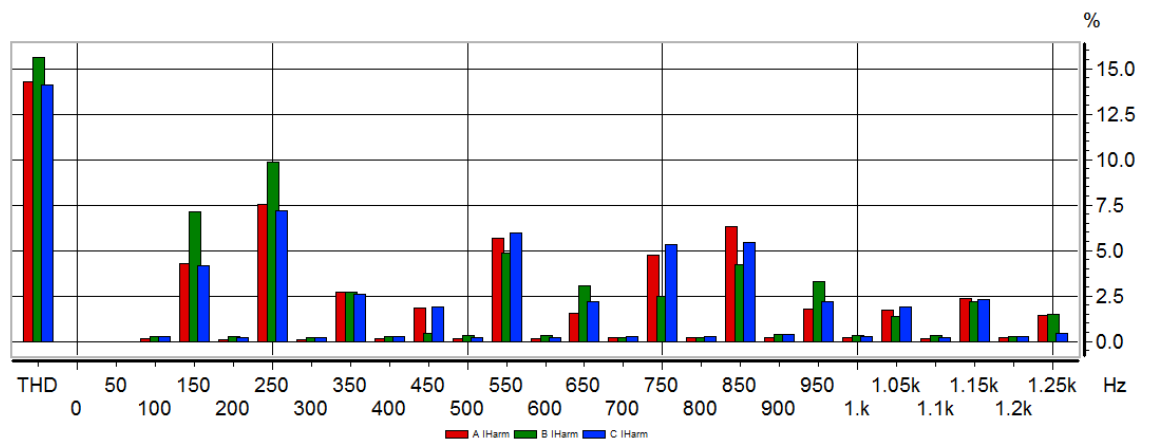
**Kuva 61. Aaltomuodot, Uudet led-putket**

Seuraavassa kuvassa 62 on demonstroitu loistevalaisinrungossa vielä olevien kondensaattorien vaikutus. Virran huippuarvo ei juurikaan muutu kondensaattorien vaatiman loistehon takia. Kuvassa on esitetty vaihevirtojen pätö- ja loiskomponentit (pätövirta, punainen lyhyt nuoli ja loisvirta, oranssi nuoli). Loisvirtaa pienentämällä saadaan näennäistehon kulutusta pienennettyä. Kapasitiivinen loisteho johtuu lähes yksinomaan runkoon jätetyistä kondensaattoreista. Poistamalla kondensaattorit ja kuristin saataisiin tehokerroin lähelle ykköstä, todennäköisesti se kuitenkin jäisi hieman kapasitiiviselle puolelle.



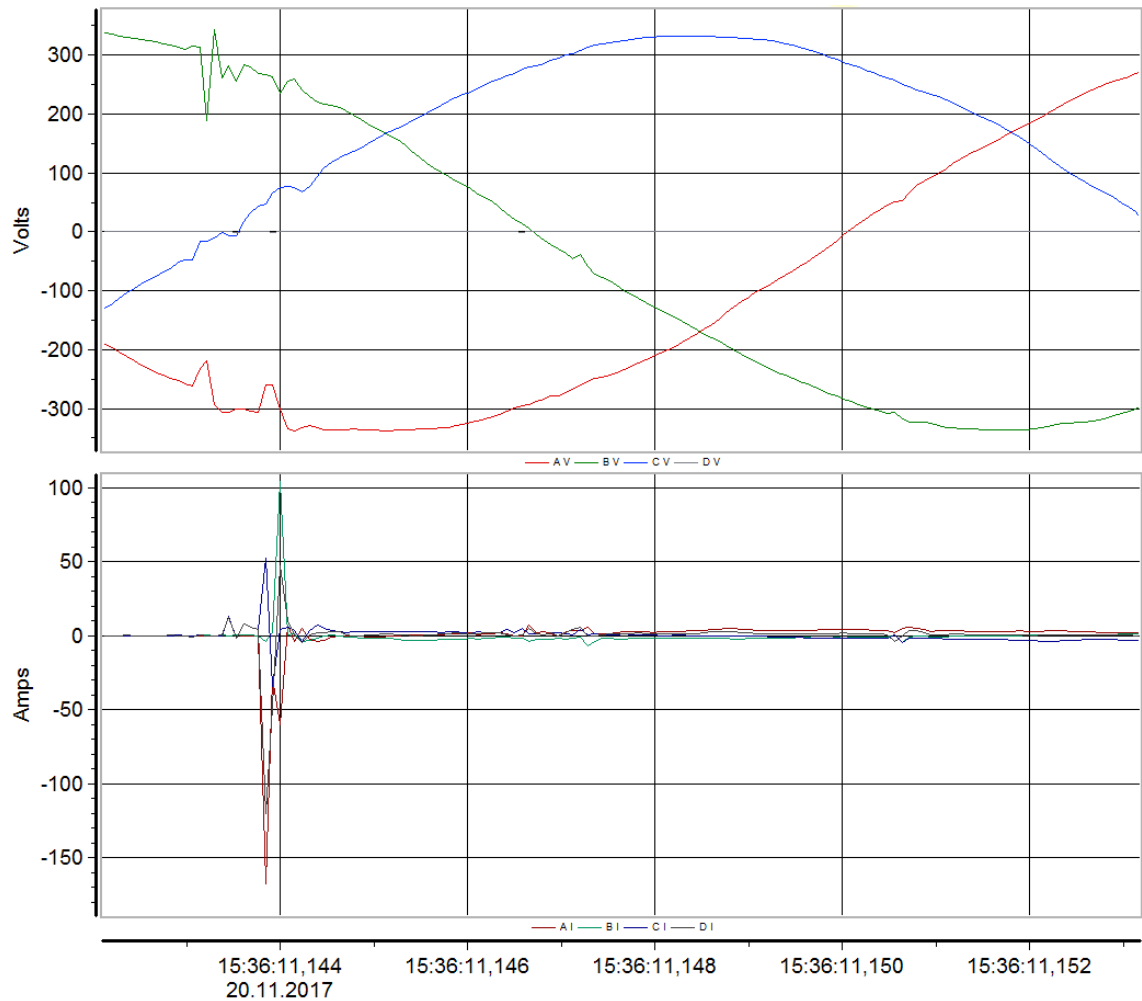
**Kuva 62. Osoitinesitys, Led-putki, pätö- ja loiskomponentti**

Sähköverkon lisääntyvän maakaapeloinnin ja induktiivisten kuormien vähenemisen myötä kapasitiivinen loisteho alkaa muutenkin olla kasvava ongelma. Seuraavassa kuvassa 63 on esitetty led-putkien virran yliaaltojakauma. Käytetystä tasasuuntausmenetelmästä ja huonosta suodatuksesta johtuen spektrissä korostuu 5. yliaalto (250 Hz).



**Kuva 63. Virran THD ja yliaaltojakauma, Uudet led-putket**

Yliaaltojakaumassa on havaittavissa huomattavasti suurempia prosentteja yliaaltoja kuin vaihdetuissa led-valaisimissa. Kokonaissärössä ei ole havaittavissa merkittäviä eroja vaihdettujen led-valaisinten ja led-putkien välillä. Kuitenkin, THD on hieman pienempi kuin vanhoilla loisteputkilla. Kolmannen yliaallon pitoisuus on puolet loisteputkien vastaavasta. Kuitenkin 5. yliaalto on kaksinkertainen loisteputkiin nähden. Seuraavassa kuvassa 64 on esitetty uusien led-putkien kytkentävirtasysäys sekä sen aiheuttama särö verkkojännitteeseen. Kytkentävirtasysäykset ovat molemmilla valaisimilla samaa suuruusluokkaa niin kestoaltaan, kuin amplitudiltaan.



**Kuva 64. Uudet led-putket, kytkentävirtasysäys**

Seuraavissa taulukoissa 4 ja 5 on esitetty kohteen tehojen muutos lähdöittäin. Taulukoista voidaan havaita, että kun monimetallivalaisimet vaihdettiin led-valaisimiin, saadaan merkittäviä energiasäästöjä. Kuitenkin, kun valaisimeen vaihdetaan vain led-putket, näennäistehon tehollisarvo ei juurikaan muutu.



**Taulukko 4. Lähdön tehot monimetallivalaisimilla sekä uusilla vaihdetuilla led-valaisimilla**

<b>Monimetallivalaisinryhmä</b>			
Vaihe	Näennäisteho (kVA)	Pätöteho (kW)	Loisteho (kVAr)
L1	2	1,6	1,1
L2	2,3	1,7	1,4
L3	1,5	1	1,1
<b>Korvaavat led-valaisimet</b>			
Vaihe	Näennäisteho (kVA)	Pätöteho (kW)	Loisteho (kVAr)
L1	0,5	0,4	-0,2
L2	0,5	0,4	-0,2
L3	0,5	0,4	-0,2

**Taulukko 5. Lähdön tehot loisteputkilla sekä uusilla vaihdetuilla led-putkilla, runkoon jätetty kuristin sekä kondensaattorit**

<b>Loistevalaisinryhmä</b>			
Vaihe	Näennäisteho (kVA)	Pätöteho (kW)	Loisteho (kVAr)
L1	0,7	0,5	0,4
L2	0,8	0,5	0,7
L3	0,6	0,5	0,4
<b>Vaihdettu vain led-putket</b>			
Vaihe	Näennäisteho (kVA)	Pätöteho (kW)	Loisteho (kVAr)
L1	0,7	0,1	-0,7
L2	0,4	0,1	-0,4
L3	0,6	0,1	-0,5

Valaistussaneerausta mietittäessä tämä on hyvä ottaa suunnittelussa huomioon. Kun saneeraus tehdään mahdollisimman edullisesti, ei saneerauksesta välttämättä seuraa lainkaan taloudellisia säästöjä. Joissain tapauksissa tehonkulutus saattaa jopa kasvaa. Taloudelliset säästöt riippuvat loistehotariffista ja siitä, mikä asiakkaan loistehotilanne oli ennen muutosta. Pienasiakkailta ei loistehosta peritä maksua.

### 6.3 Mittauskohde 3, Turku

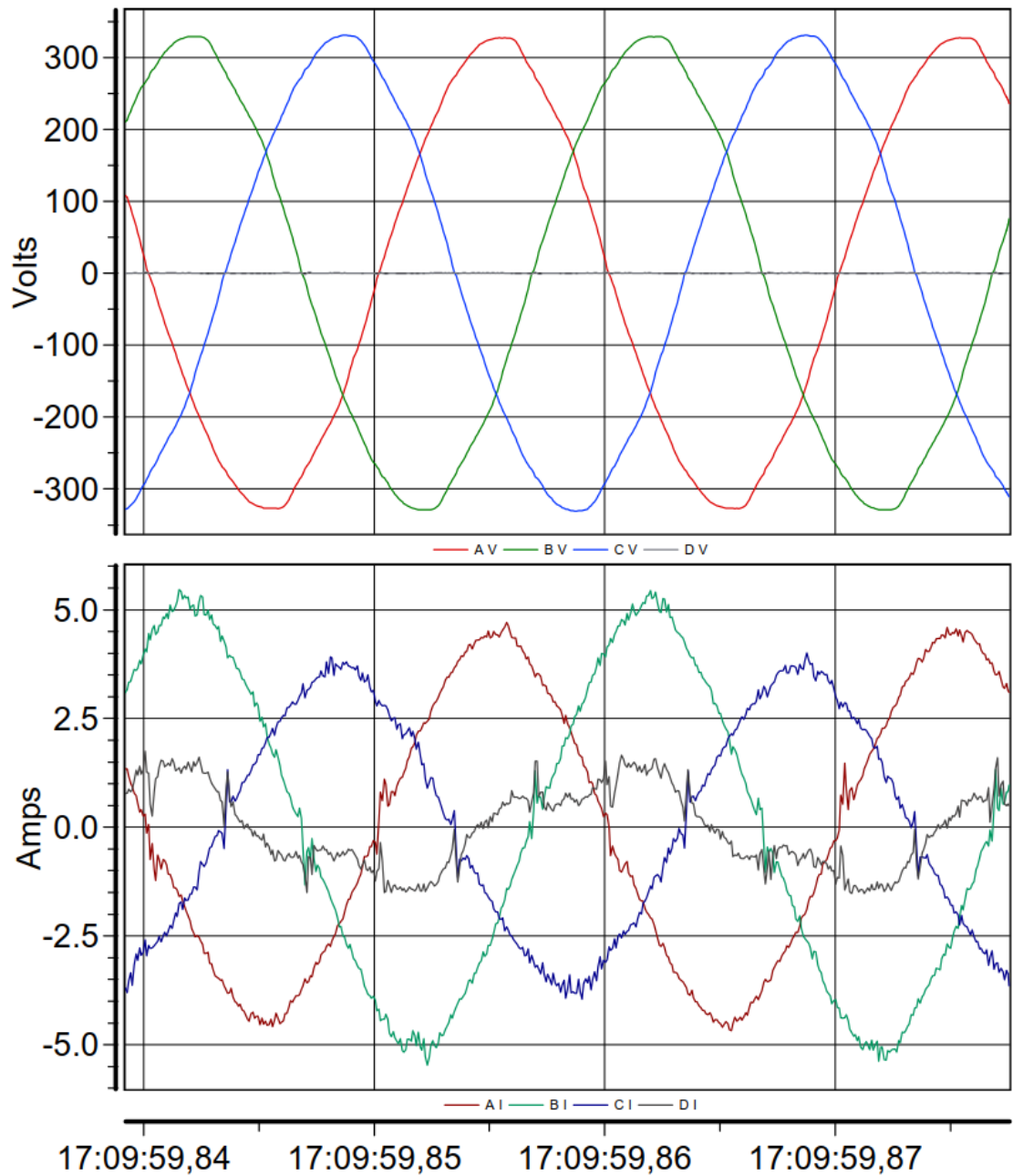
Turussa mittauskohteena oli vaihtoautomyymälä, johon tehtiin valaistussaneeraus. Vanhat loisteputket korvattiin led-valaisimilla. Myymälä jakautui kahteen osaan ja toisessa osassa loistevalaisin runkoon oli jo aiemmin vaihdettu led-putket. Kuvassa 65 on esitetty mittausjärjestelyt keskuksella.



**Kuva 65. Mittauskytkentä, Turku**

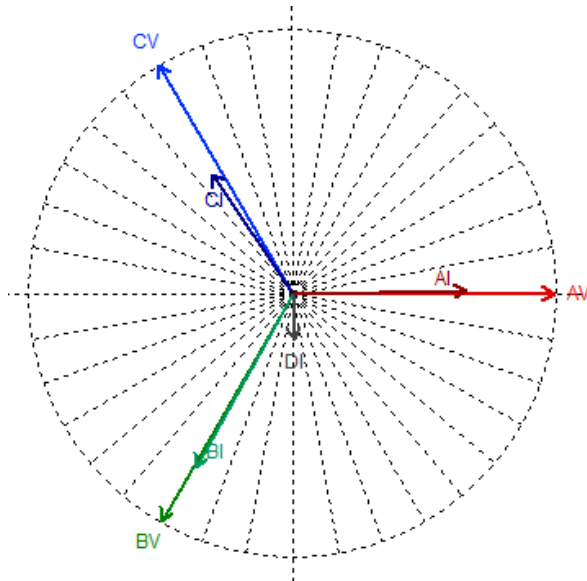
Mittaus suoritettiin samaan tapaan kuin muissakin saneerauskohteissa. Keskuksella mitattiin ensin valaistuslähtöjen aaltomuotoja vanhalla valaistuksella sekä uudella valaistuksella, kun saneeraus oli saatu valmiiksi.

Kuvassa 66 on esitetty loistevalaisinlähdön aaltomuodot. Aaltomuodoista on helposti havaittavissa, että lähdön kuormitus ei ole aivan symmetrinen. Virran aaltomuoto on kuitenkin hyvin lähellä siniaaltoa ja vaihe-ero on pieni, joka voidaan havaita vielä selkeämmin kuvasta 67.



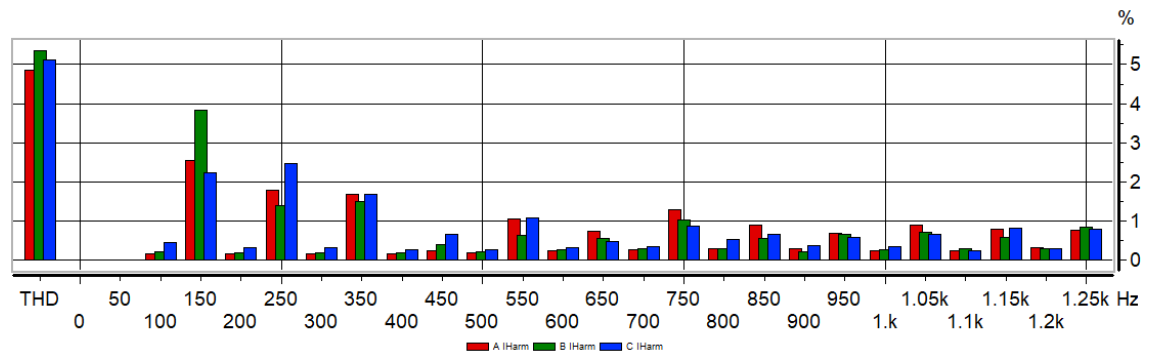
**Kuva 66. Aaltomuodot, Vanhat loistevalaisimet**

Aaltomuoto on hyvin samankaltainen, kuin laadukkaan led-valaisimen aaltomuoto. Kuvaajasta voidaan päätellä, että kyseessä on jo uudemmalla loistevalaisintekniikalla varustettuja loistevalaisimia. Valaisimissa on siis elektroninen liitäntälaite passiivisten komponenttien, magneettikuristimen ja kompensointikondensaattorien sijaan. Nollavirran amplitudi on n. 42 % vaihevirran amplitudista.



**Kuva 67. Osoitinesitys, loistevalaisinryhmä**

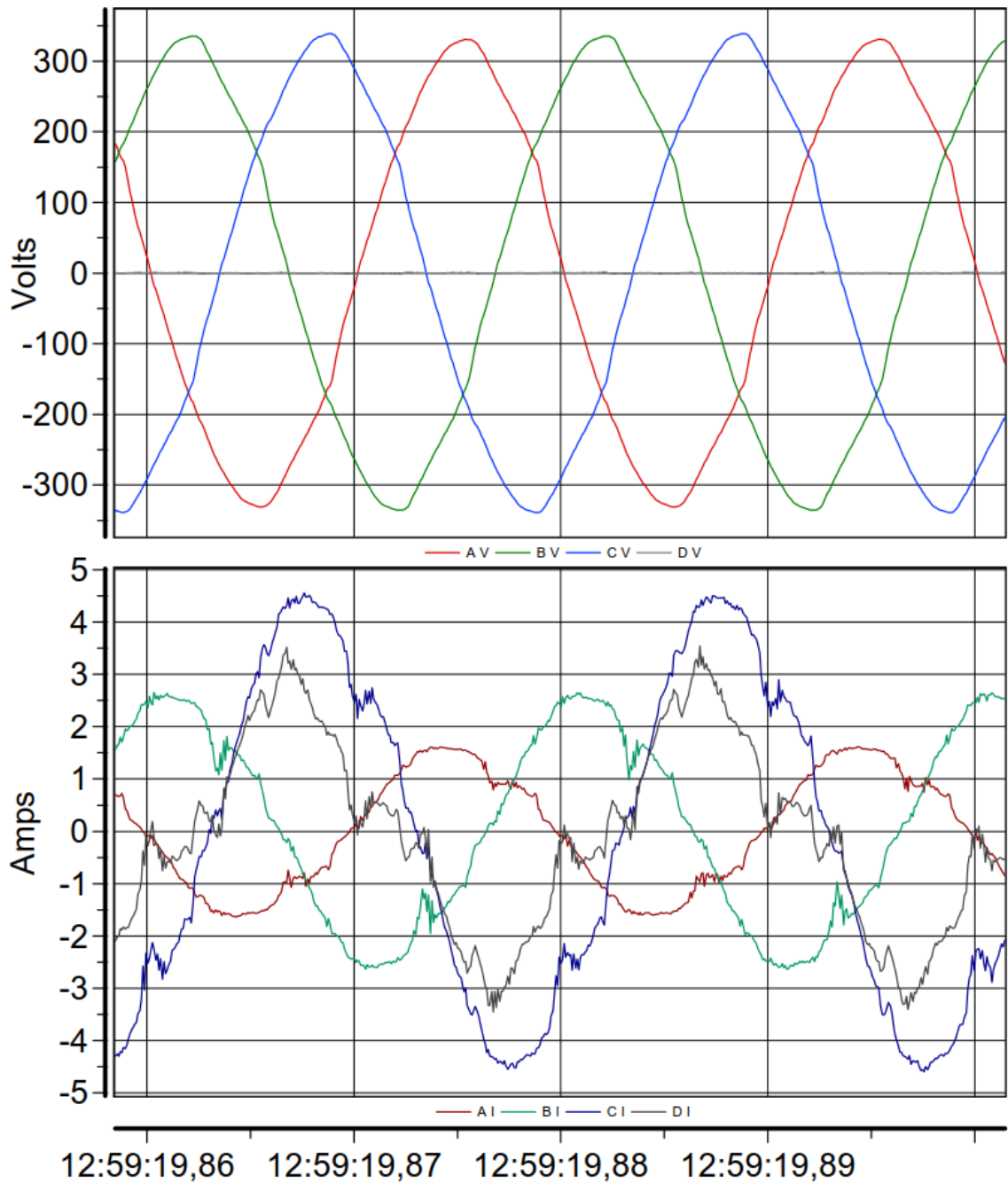
Vaihe-ero jokaisessa vaiheessa on lähes 0 eli tehokerroin on hyvin lähellä ykköstä. Kuvasta 68 voidaan jälleen havaita, että elektronisella liitälaitteella yliaaltovirtojen komponentit ovat suhteellisen pieniä.



**Kuva 68. Virran THD ja yliaaltojakauma, Vanhat loistevalaisimet**

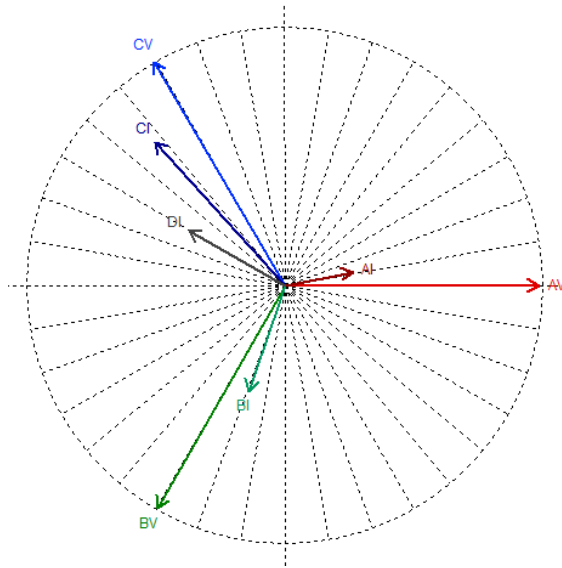
Kuitenkin, aktiivisen elektronisen liitälaitteen kytkentähetket ovat pulssimaisia nopeita reunoja, ne aiheuttavat myös jonkin verran hyvin suuritaajuisia yliaaltokomponentteja. Elektronisella liitälaitteella varustettujen loistevalaisinten virran THD sekä vaihe-ero on huomattavasti pienempi kuin millään aiemmalla valaistusratkaisulla. THD on n. 5 % ja vaihe-ero on lähes 0 [76, 77].

Seuraavassa kuvassa 69 on esitetty aiemmin vaihdettujen led-putkien aaltomuodot. Virta on jälleen lähes samassa vaiheessa jännitteen kanssa, joten tehokerroin on hyvä. Virran aaltomuodossa on havaittavassa säröä lähellä virran huippuarvoa. Lähdon THD on n. 15 %, mikä on samaa suuruusluokkaa aiemmin käsiteltyjen led-valaisinten kanssa. Kolmannen yliaallon osuus kyseisillä led-putkillä on huomattavan suuri.



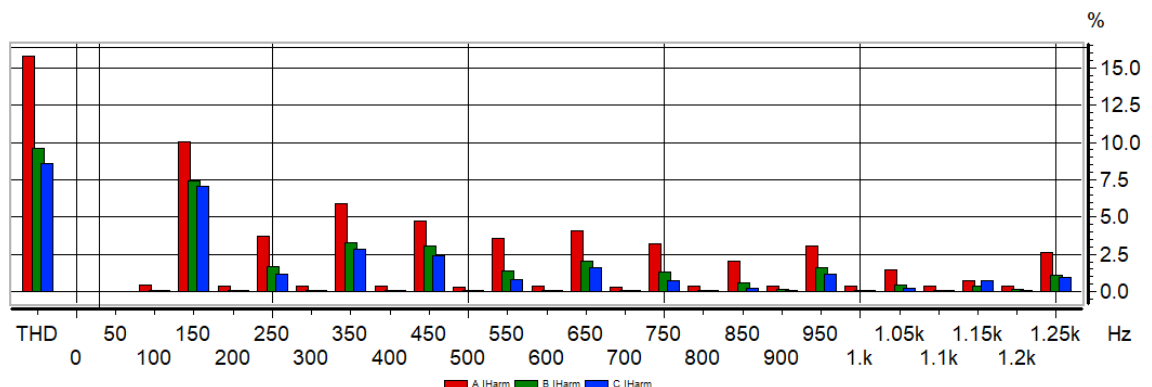
**Kuva 69. Aaltomuodot, Aiemmin vaihdetut led-putket**

Kuitenkin, valaisimien liitäntälaitteessa on käytetty halvempaa, mutta riittävää tekniikkaa, sillä virran aaltomuoto ei ole aivan sinimuotoista, Lähdön kuormitus on myös epäsymmetrinen ja THD on sitä suurempi, mitä pienempi lähdön kuormitus on. Epäsymmetria näkyy myös nollavirtana. Nollavirta on lähdössä suurempi, kuin vaiheiden L1 (AI) ja L2 (BI). Samat havainnot voidaan tehdä myös osoitinympyrän avulla [77]. Osoitinympyrä on esitetty kuvassa 70.



**Kuva 70. Osoitinesitys, Aiemmin vaihdetut led-putket**

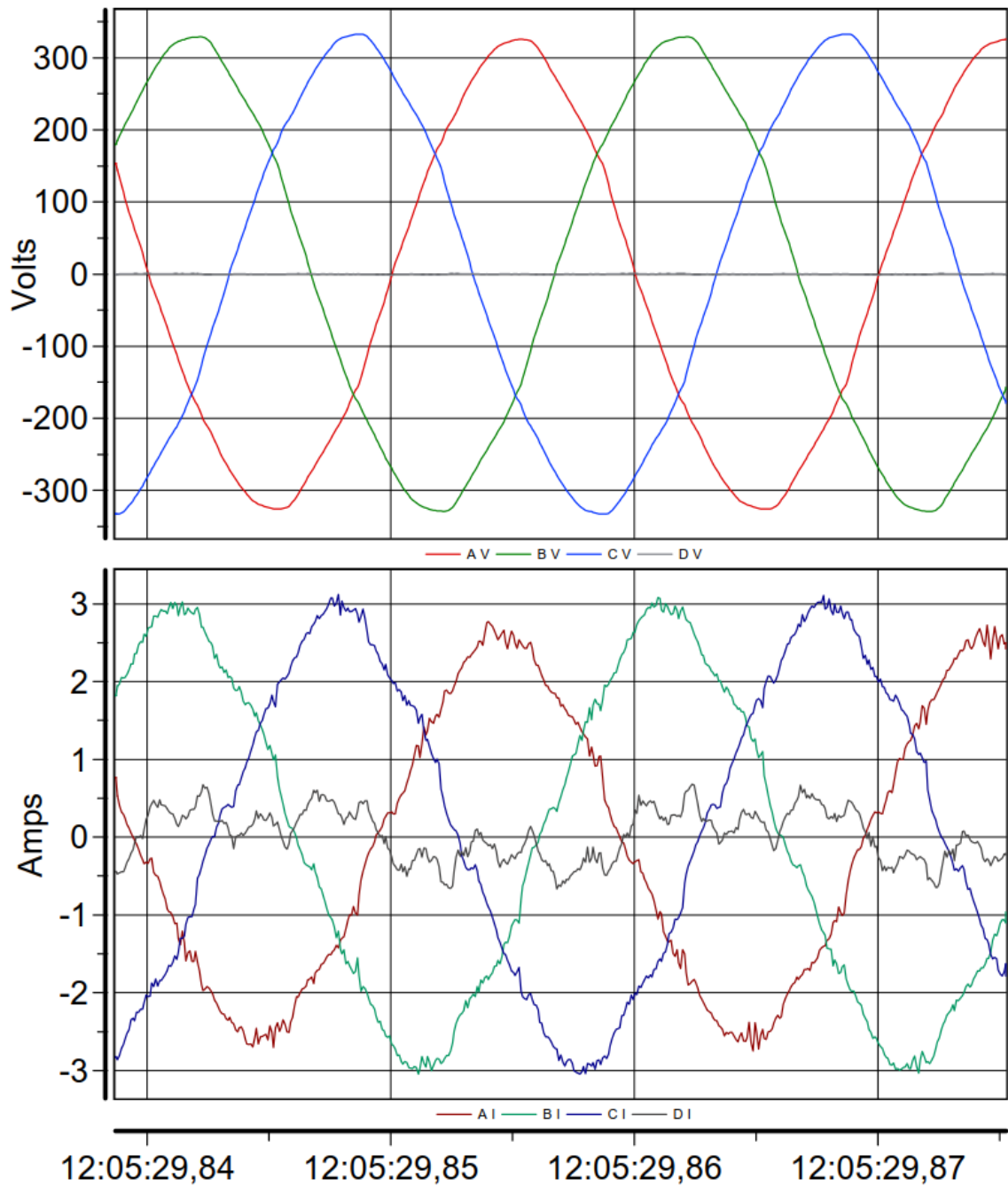
Vaihe-eron voidaan nähdä olevan n.  $10^\circ$  ja hieman kapasitiivisella puolella. Yliaaltovirtojen prosentuaalinen osuus on tämänkaltaisella liitälaitteella suurempi, kuten kuvasta 71 voidaan havaita. Yliaaltovirtoja on myös havaittavissa hyvin korkeillakin taajuuksilla, johtuen elektronisen liitälaitteen nopeista kytkennöistä.



**Kuva 71. Virran THD ja yliaaltojakauma, Aiemmin vaihdetut led-putket**

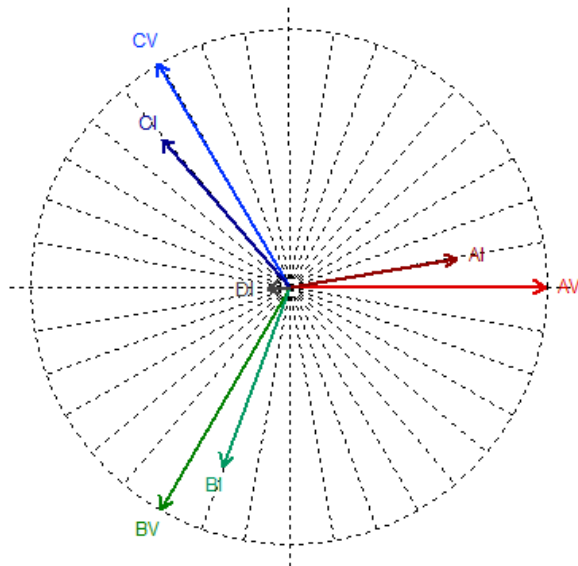
Sähkönlaatuun vaikuttaa liitälaitteen laatu ja esimerkiksi led-putkien osalta laadusta joudutaan monesti tinkimään tilanpuutteen vuoksi. Led-putkissa liitälaitte on putkien sisällä, jolloin siihen ei saada riittävästi sähkönlaatua parantavia komponentteja, mutta saadaan kuitenkin kriteerit täyttäviä tuotteita.

Seuraavassa kuvassa 72 on esitetty elektronisella liitälaitteella varustettujen loistevalaisimien tilalle vaihdettujen led-valaisinten aaltomuodot. Jälleen kun led-tekniikalla toteutettuun valaistusratkaisuun on valittu valaisinpaketti, virran aaltomuodot noudattavat hyvin lähelle siniaaltoja ja tehokerroin on hyvä [78].



**Kuva 72. Aaltomuodot, korvaavat led-valaisimet**

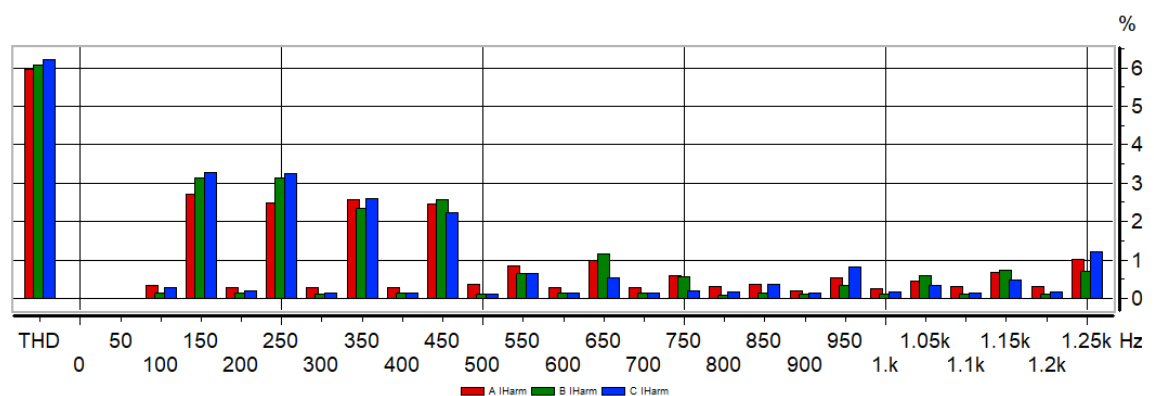
Nollavirran amplitudin on n. 0.5 A, joka on vain n. 17 % vaihevirran amplitudista. Kuitenkin, osoitinympyrästä, joka on esitetty kuvassa 73, voidaan havaita, että led-valaisin on tässäkin tapauksessa hieman kapasitiivinen kuorma ja vaihe-eroa on aiemmin vaihdettujen led-putkien tapaan n.  $10^\circ$ . Vaihe-ero jännitteen ja virran välillä on hyvin pieni ja nollavirta on käytännössä olematon.



**Kuva 73. Osoitinesitys, korvaavat led-valaisimet**

Osoitinesityksestä ja aaltomuotokuvaajasta voidaan havaita, että kuormitus on hyvin symmetrinen. Tämä johtuu siitä, että kun vanhojen loistevalaisinten tilalle vaihdetaan led-valaisimet, kaikki ryhmään asennetut valaisimet toimivat. Vanhoissa valaisimissa oli muutamia rikkiäisiä loisteputkia. Led-valaistuksella myös kuormituksen symmetrisyys säilyy huomattavasti pidempään, eikä yhden valaisimen rikkoutuminen vaikuta symmetriaan yhtä merkittävästi kuin loisteputkilla, sillä led-valaisimen ottoteho on pienempi.

Alla olevassa kuvassa 74 on esitetty valaisinryhmän virtojen yliaaltojakaumat. Jakauksessa korostuu 3., 5., 7., sekä 9. yliaalto. Näidenkin pitoisuudet ovat kuitenkin pieniä ja THD jää n. 6 % perusaaltoisesta virrasta. THD on todella pieni verrattuna aiemmin esitettyihin led- tai loistevalaisimiin [79].



**Kuva 74. Virran THD ja yliaaltojakauma, Korvaavat led-valaisimet**

Seuraavassa taulukossa 6 on esitettyä kootusti valaistussaneerauksen vaikutus kolmivaiheisen lähdön tehoihin. Taulukon arvoista havaitaan selvästi, energiasäästöt led-tekniikkaa hyödyntävän valaistuksen eduksi. Lisäksi led-tekniikan mahdollistava helpompi ohjaus tuo energiasäästöjä entisestään [80].



***Taulukko 6. Lähdön tehot vanhoilla loistevalaisimilla sekä korvaavilla led-valaisimilla, lisäksi aiemmin vaihdettujen led-putkien tehot, rungosta poistettu kuristin sekä kondensaattorit***

<b>Loistevalaisinryhmä</b>			
Vaihe	Näennäisteho (kVA)	Pätöteho (kW)	Loisteho (kVAr)
L1	0,71	0,7	-0,01
L2	0,8	0,8	-0,02
L3	0,59	0,59	-0,04
<b>Korvaavat led-valaisimet</b>			
Vaihe	Näennäisteho (kVA)	Pätöteho (kW)	Loisteho (kVAr)
L1	0,4	0,4	-0,07
L2	0,45	0,45	-0,08
L3	0,45	0,45	-0,09
<b>Aiemmin vaihdetut led-putket</b>			
Vaihe	Näennäisteho (kVA)	Pätöteho (kW)	Loisteho (kVAr)
L1	0,25	0,25	-0,04
L2	0,41	0,4	0,08
L3	0,71	0,7	-0,15

Tuloksista voidaan huomata, että nyt energiaa säästyy verrattuna aiempaan taulukoihin 4 ja 5, kun saneerauksen yhteydessä vaihdetaan koko valaisin ja loistevalaisimen rungosta poistetaan kondensaattorit sekä kuristin.

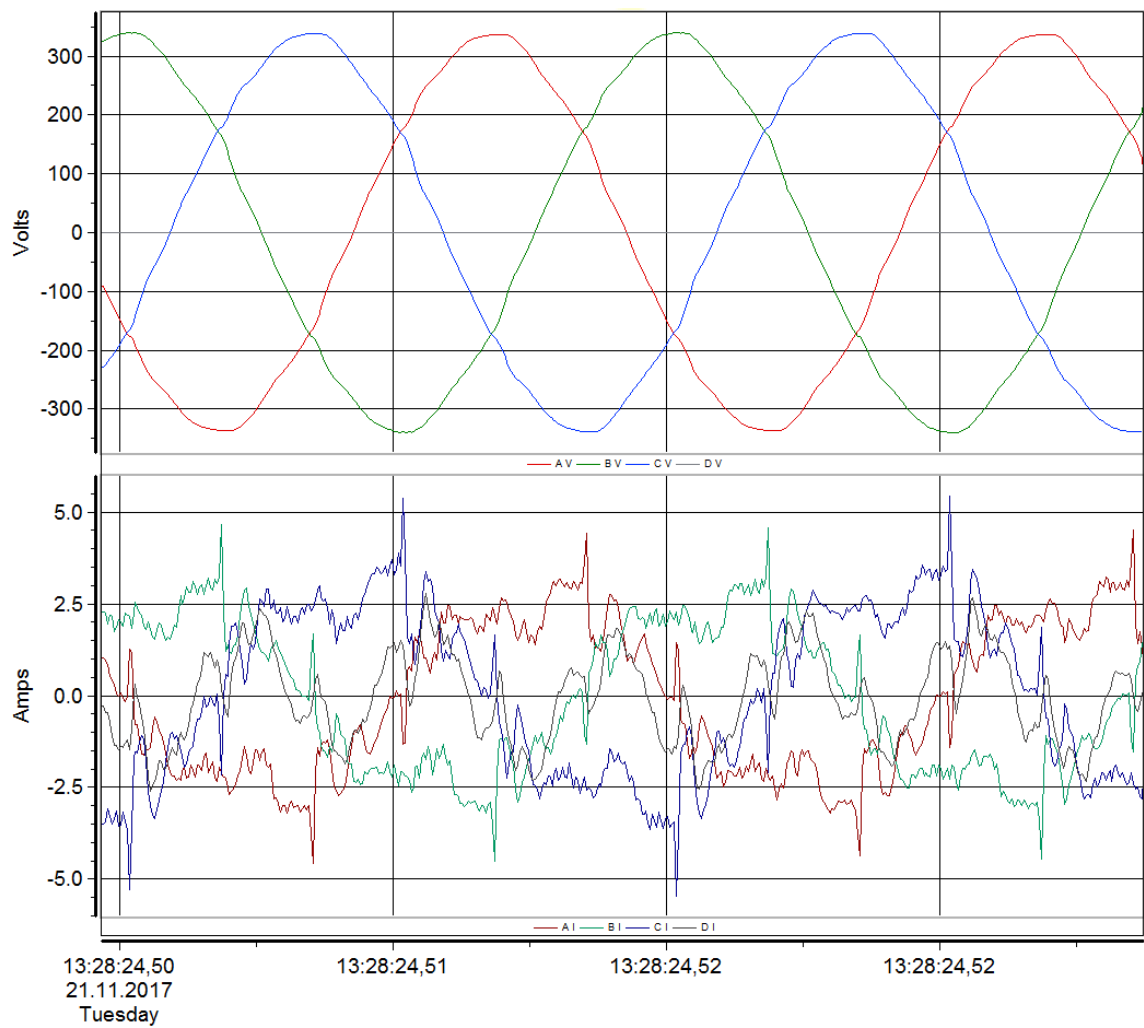
## 6.4 Mittauskohde 4, Pori

Porissa mittauskohteena oli sairaalan arkisto, johon tehtiin valaistussaneeraus. Erittäin vanhat loisteputket korvattiin led-valaisimilla. Lisäksi kohteeseen asennettiin myös DALI valaistuksenohjausjärjestelmä. Kuvassa 75 on esitetty Porin kohteen mittausjärjestelyt.



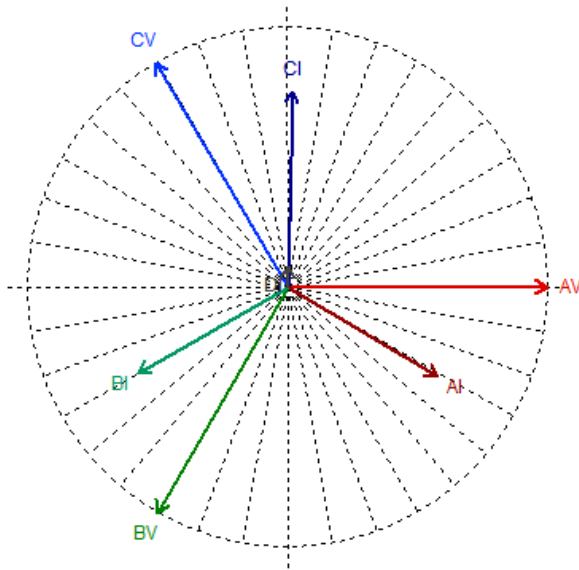
**Kuva 75. Mittauskytkentä, Pori**

Mittauksissa käytössä oli vielä vanha keskus, joka siirrettiin ja saneerattiin valaistussaneerauksen yhteydessä. Saneerattu keskus on esitetty kuvassa 79. Seuraavassa kuvassa 76 on esitetty loistevalaisinryhmän aaltomuodot.



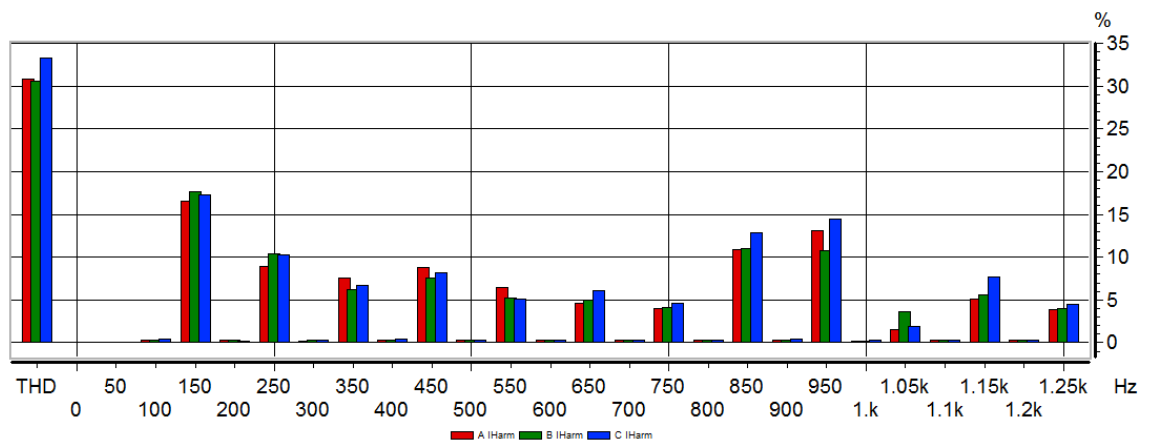
**Kuva 76. Aaltomuodot, Vanhat loistevalaisimet**

Virran aaltomuoto on hyvin vahvasti säröytynyttä. Aaltomuotokuvaajasta voidaan suoraan sanoa, että siinä on hyvin paljon yliaaltoja. Nollavirran amplitudi on n. 50 % vaihevirran amplitudista. Osoitinympyrästä, joka on esitetty kuvassa 76, voidaan havaita, että kuormitus on vahvasti induktiivinen ja vaihesiirtoa on n. 30°.



**Kuva 77. Osoitinesitys, vanhat loistevalaisimet**

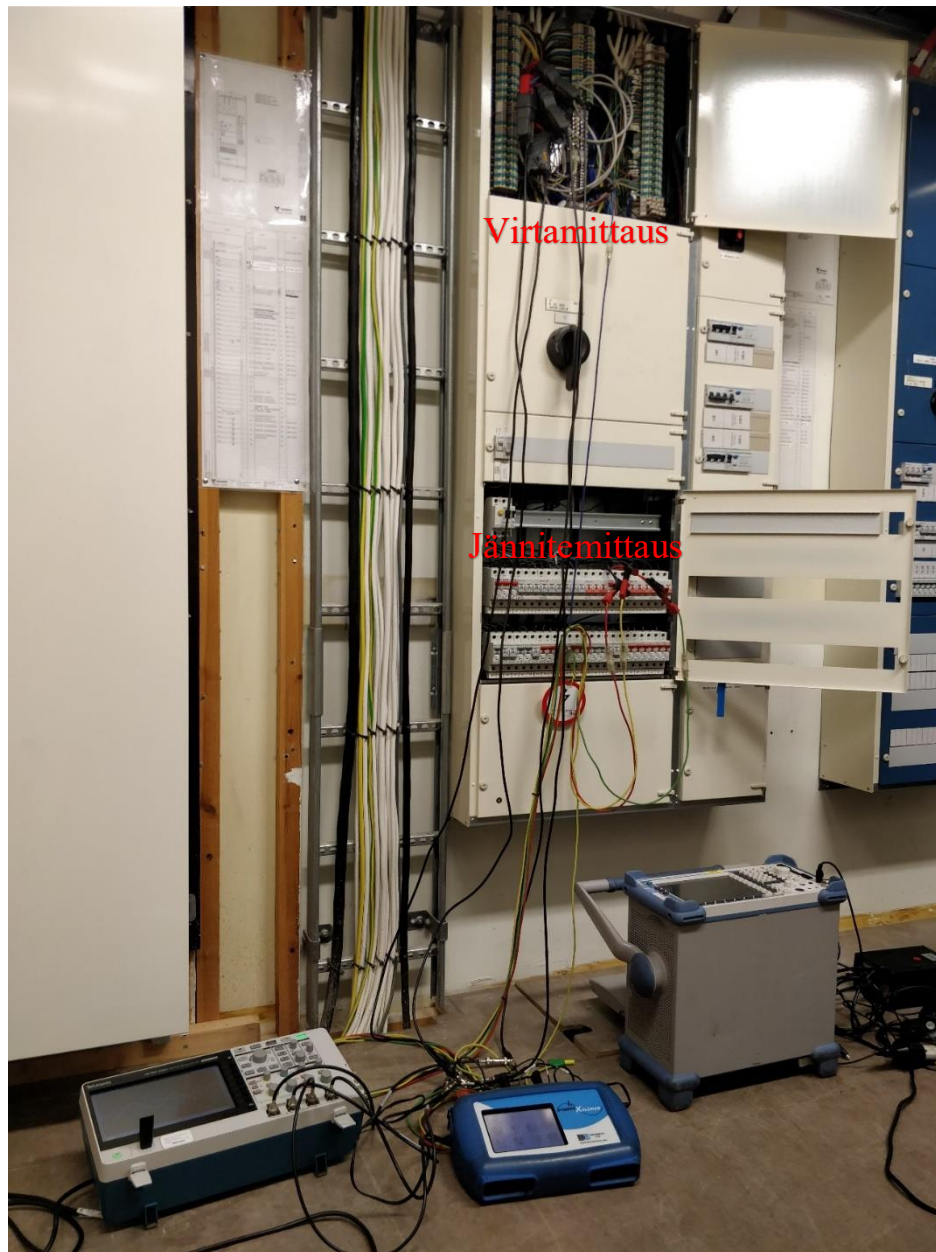
Alla olevassa kuvassa 78 on esitetty loistevalaisinlähden yliaaltojakauma. Jakaumasta voidaan havaita, että virrassa on erittäin paljon harmonisia yliaaltokomponentteja.



**Kuva 78. Virran THD ja yliaaltojakauma, Vanhat loistevalaisimet**

Vaiheiden kokonaissärökertoimet ovat 30-35 % perustaajuisesta (50 Hz) vaihevirrasta. Harmoniset yliaallot voivat aiheuttaa mm. kondensaattorien ennenaikaista ikääntymistä, lisääntyneitä häviöitä muuntajissa, meluhaittoja tai laitteiden virhetoimintoja [80, 81].

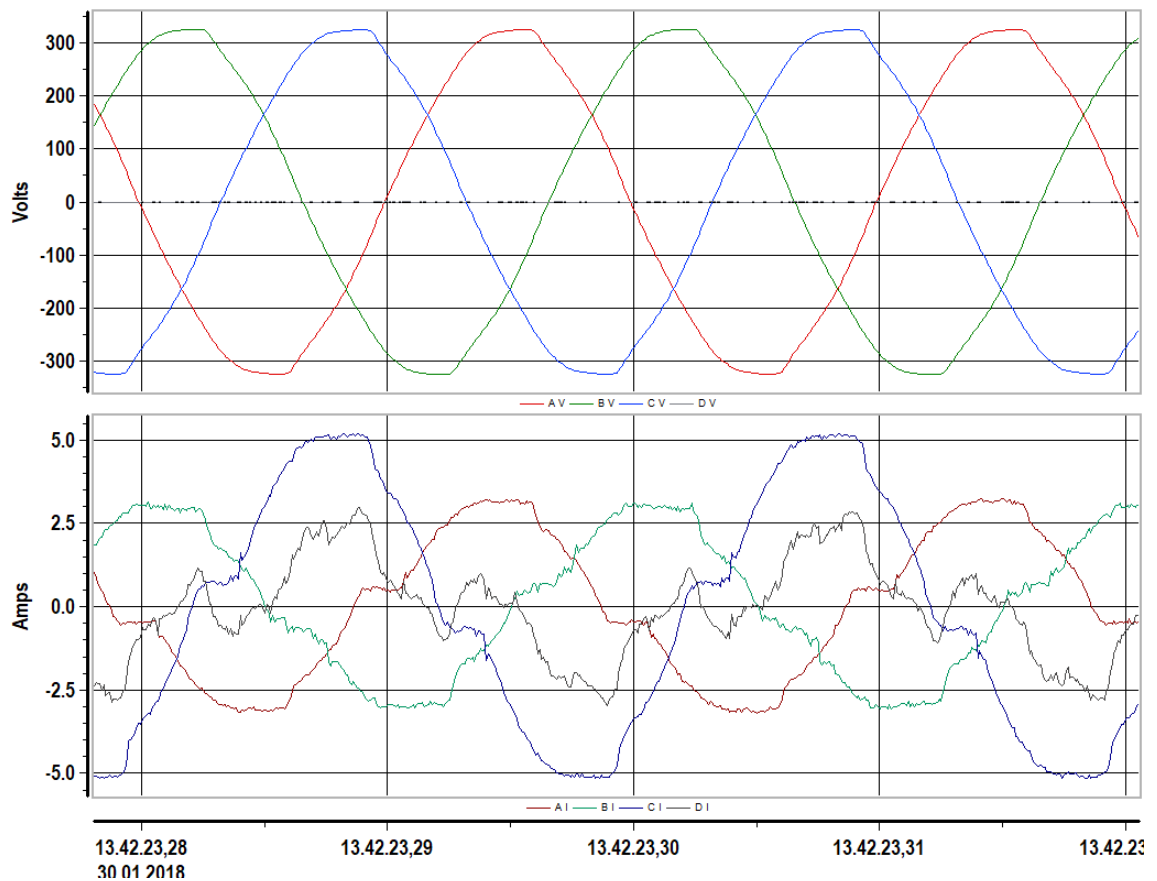
Seuraavassa kuvassa 79 on esitetty mittausjärjestelyt uudella keskuksella ja uusilla valaisimilla. Uudella keskuksella mittaus suoritettiin samaan tapaan kuin muissakin saneerauskohteissa.



***Kuva 79. Mittausjärjestely, uusi keskus***

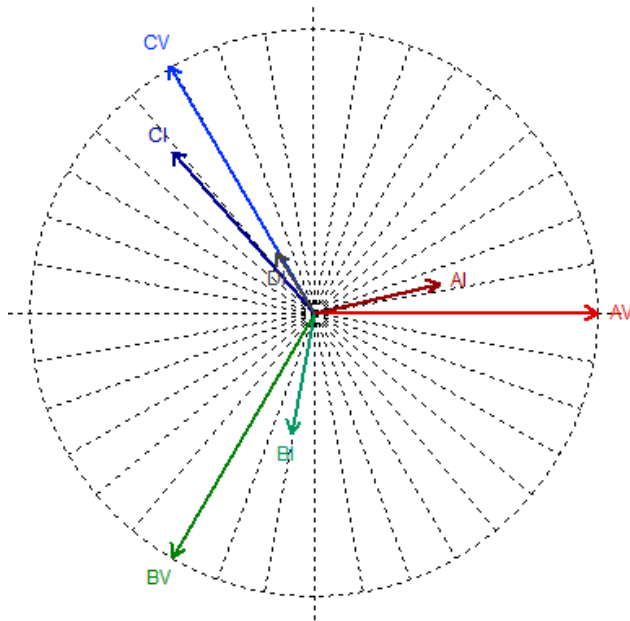
Mittauskohteessa lähtöjen ryhmittely oli kuitenkin keskuksen saneerauksen yhteydessä muuttunut. Muutoksesta huolimatta keskukselta onnistuttiin mittaamaan vastaavaa valaistusryhmää, jota vanhallakin keskuksella mitattiin.

Seuraavassa kuvassa 80 on esitetty mittaustuloksista aaltomuotokuvaaja. Lähdössä on havaittavissa hieman epäsymmetriaa, sillä vain osa valaisimista oli mittaushetkellä päällä.



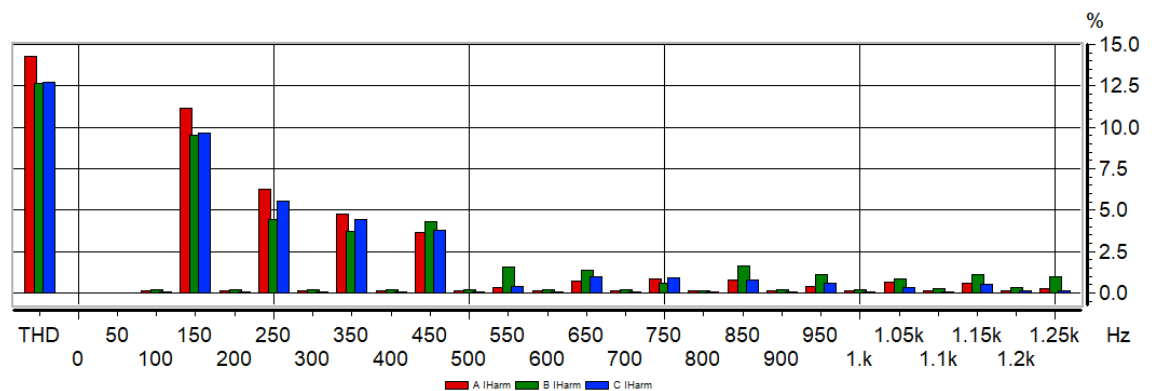
**Kuva 80. Aaltomuodot, uudet led-valaisimet**

Virran aaltomuodossa on selvästi havaittavissa himmentimen vaikutus. Tyristorihimmentimen käytöstä aaltomuodossa näkyy ohjauskulman mukainen tila, jossa virta pysyy hetkellisesti nollassa. Nollavirran amplitudi on n. 80 % vaihevirran amplitudista. Seuraavassa kuvassa 81 on esitetty uusien led-valaisimien osoitinesitys.



**Kuva 81. Osoitinesitys, uudet led-valaisimet**

Vaihe-ero on hyvin pieni ja jälleen led-valaisimille tyypillisesti kapasitiivinen. Epäsymmetriasta johtuen nollavirta on lähes vaihevirtojen suuruinen. Seuraavassa kuvassa 82 on esitetty virran yliaaltojakauma.



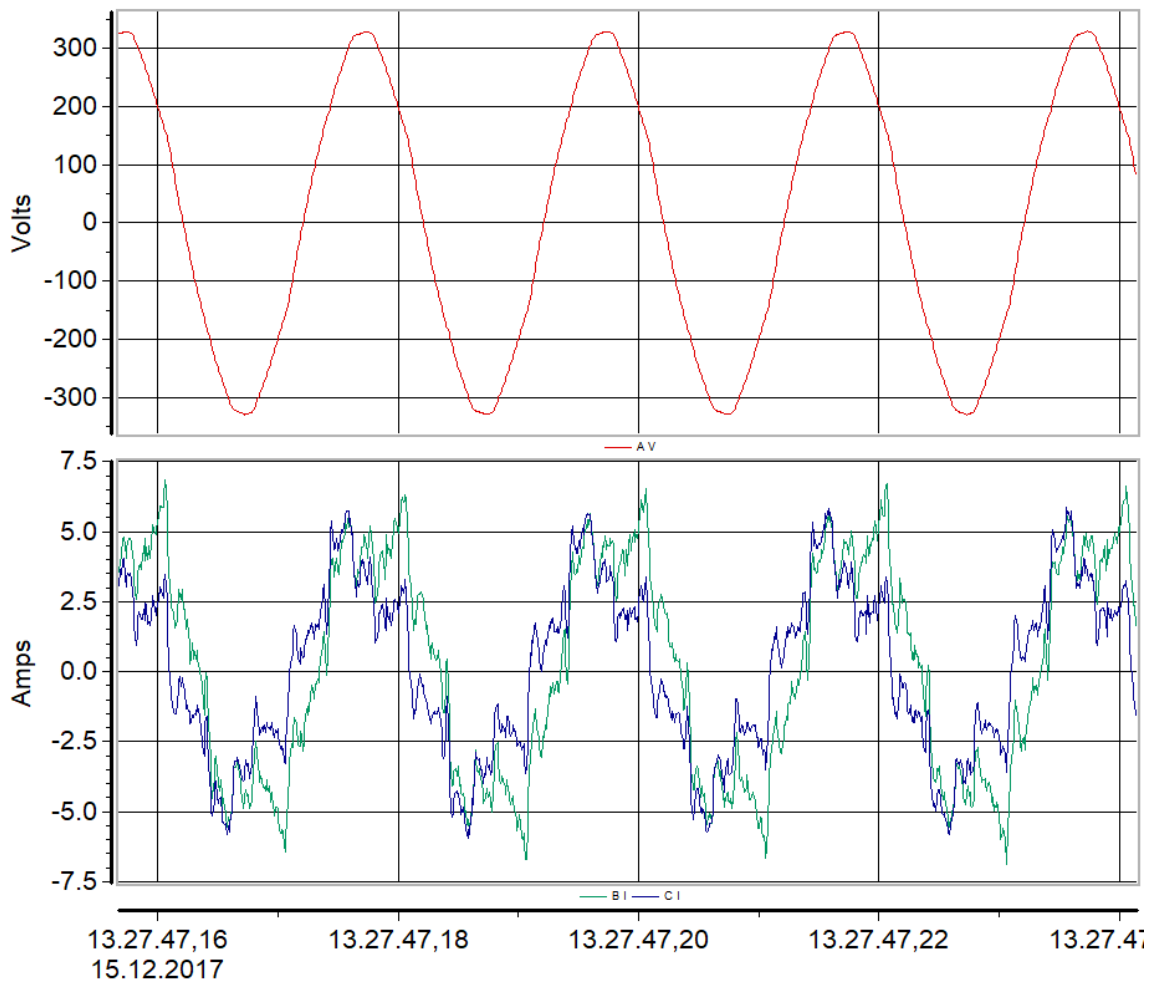
**Kuva 82. Virran THD ja yliaaltojakauma, Uudet led-valaisimet**

Kuvassa 82 yliaaltopitoisuus käyttäytyy tyristoriohjaukselle tyypillisesti. Mikäli himmennin hyödyntäisi pulssinleveysmodulaatiota (PWM) ohjauksessa, olisi yliaaltopitoisuus huomattavasti pienempi. THD on jälleen samaa suuruusluokkaa, kuin aiemmissakin led-ratkaisuissa, n. 12.5 % [81, 82].

## 6.5 Mittauskohde 5, Kuopio

Kuopion mittauskohteena oli suuri tuotantolaitos. Mittauksissa keskityttiin valaistuksen osalta valaistuksen keskinäisvaikutuksiin, sillä kohde oli poikkeuksellinen muihin kenttämittauskohteisiin verrattuna. Kohteessa vanhoja loisteputkia oli vaihdettu sitä mukaan led-putkiin, kun loisteputket olivat hajonneet. Kohteessa on asennettuna sekalaisesti eri

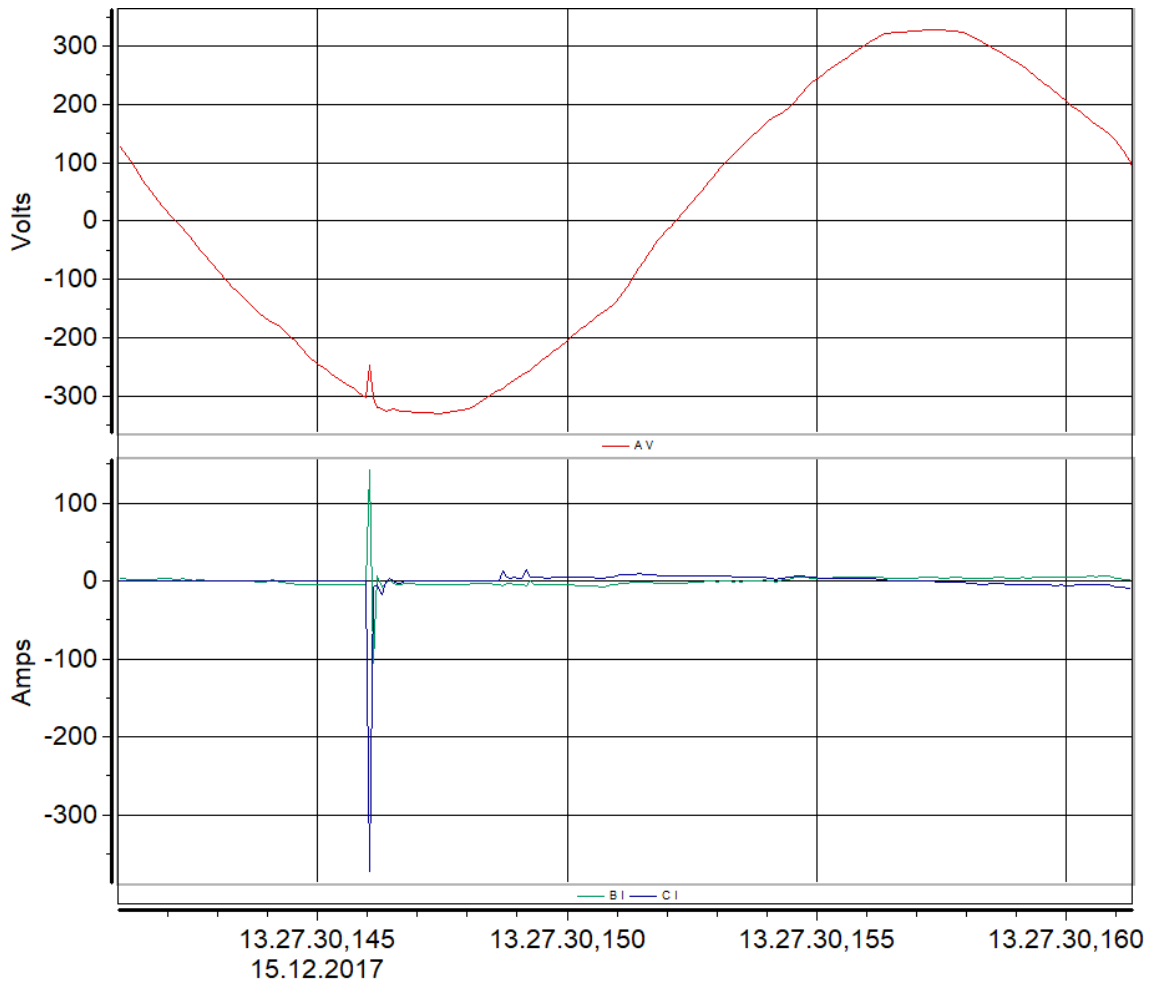
valmistajien led-putkia. Mittauksissa siis tutkittiin saman vaiheen, eri ryhmien välisiä vuorovaikutuksia. Seuraavassa kuvassa 83 on esitetty eri lähtöjen saman vaiheen virtojen käyrämuodot.



**Kuva 83. Aaltomuodot, Eri valaisinryhmien sama vaihe**

Virtojen käyrämuodot johtuvat hyvin sekalaisesta valaistuskuormasta; toisella lähdöllä oli kytkettynä loistevalaisimia, joissa on kaksi putkea. Yhdessä valaisimessa molemmat valaisimet oli vaihdettu led-putkiksi, toisessa vanhat loisteputket ja kolmannessa loisteputki sekä led-putki. Keskinäisvaikutus on esitetty kuvassa 84. Toisessa lähdössä oli kytkettynä myöskin vastaavia valaisimia, näistä yhdessä oli päistä hehkuva putki, toisessa oli kaksi led-putkea ja kahdessa muussa molemmat loisteputkia. Virtojen käyrämuodoista havaitaan, että vihreä käyrämuoto on lähdön, jossa loistevalaisimet suurin kuorma. Kuvasta huomataan, että virrat ovat samassa vaiheessa toisiinsa ja jännitteeseen nähden. Keskuksella tehtiin jännitekatko toisen ryhmän L1-vaiheella [83].





**Kuva 84. Aaltomuodot, KytKentätransientin keskinäisvaikutus**

Tuloksista voidaan havaita, että kytKentätilanteessa virtapiikki näkyy vastakkaisesti rinnakkaisen lähdön samassa vaiheessa. Tällöin päälle kytkettävä valaisin saa kytKentätransienttiinsa virtaa varsinaisen syötön lisäksi myös rinnakkaisesta lähdöstä, eli tämän lähdön virta kulkee valaisimesta keskukselle päin ja tästä jälleen rinnakkaiseen päälle kytkettyyn lähtöön. Virtapiikki on huomattavasti suurempi, kuin aiemmissa tapauksissa. Transientin kesto on kuitenkin todella lyhyt, joten siitä tuskin aiheutuu sulakkeiden virhelaukaisuja [84, 85].

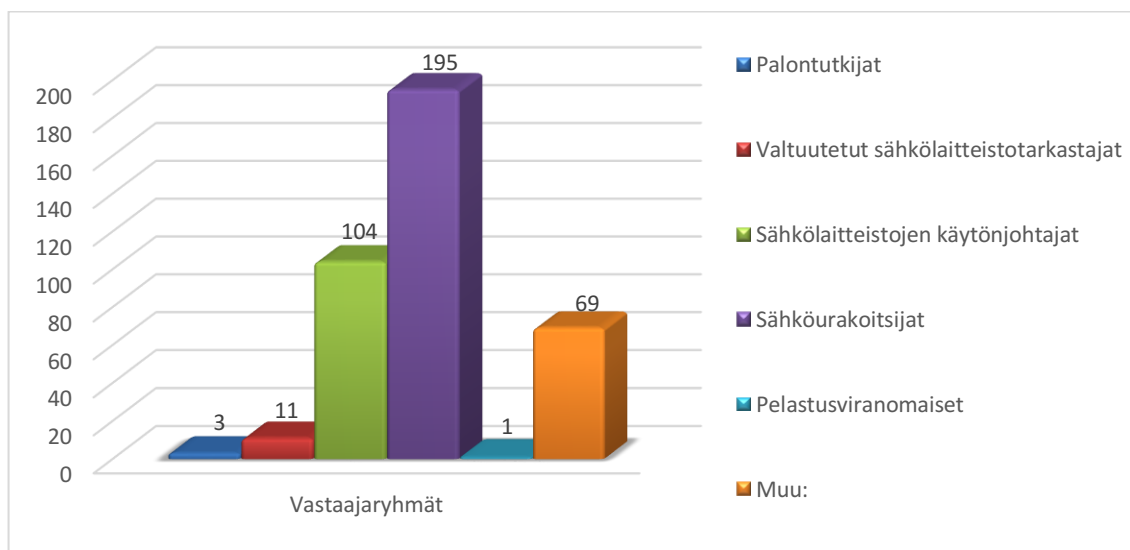
## 7. KYSELYTUTKIMUS JA TILASTOT

Tutkimuksen osana tuotettiin myös kyselytutkimus sekä tehtiin yhteistyötä pelastusopiston pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto-järjestelmän (PRONTO) pääkäyttäjien kanssa. Kyselyn avulla saatiin käytännön kokemuksia sähköalan ammattilaisilta. Kyselytutkimuksen avulla saadaan kohdennettua valaisinten havaitut turvallisuusriskit valaisintyypeittäin sekä komponenteittain. Tutkimuksen perusteella saadaan myös käsitys käyttöympäristön vaikutuksesta vikaantumiseen. Lisäksi noin 120 vastaajalta saatiin lisätietoja ja materiaalia, jotka auttoivat hyvin kokemusten kokonaiskuvan kartoittamisessa.

Pelastusopiston kanssa tehdyssä yhteistyössä tulokseksi saatiin karkea arvio led-tekniikkaa hyödyntävän valaistuksen aiheuttamista hälytystapauksista. Järjestelmässä ei kuitenkaan ole vielä yksilöintiä valaisintyypeille, joten järjestelmään kirjatut tapaukset riippuvat kirjauksen tekijästä.

### 7.1 Kyselytutkimus

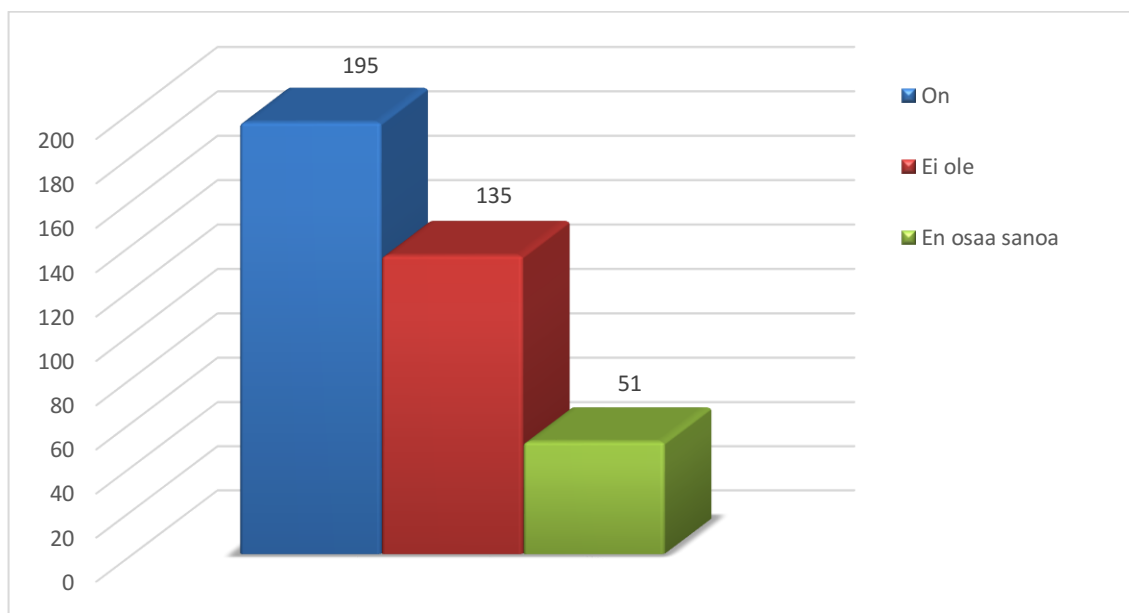
Sähköalan ammattilaisille lähetettiin kysely koskien heidän kokemuksiaan valaistuksen palo- ja sähköturvallisuudesta. Kyselyyn saatiin lähes 400 vastausta. Vastaajien ammattitaitausten jakautuminen kappalemäärinä on esitetty alla olevassa kuvassa 85.



**Kuva 85. Kyselyn vastaajaryhmät**

Muu ryhmään kuului muun muassa: projektipäälliköitä, sähkösuunnittelijoita, sähkötyönjohtajia sekä sähköasentajia. Keskimäärin vastaajilla oli kokemusta tehtävistä sähkölaitteistojen parissa yli 25 vuotta.

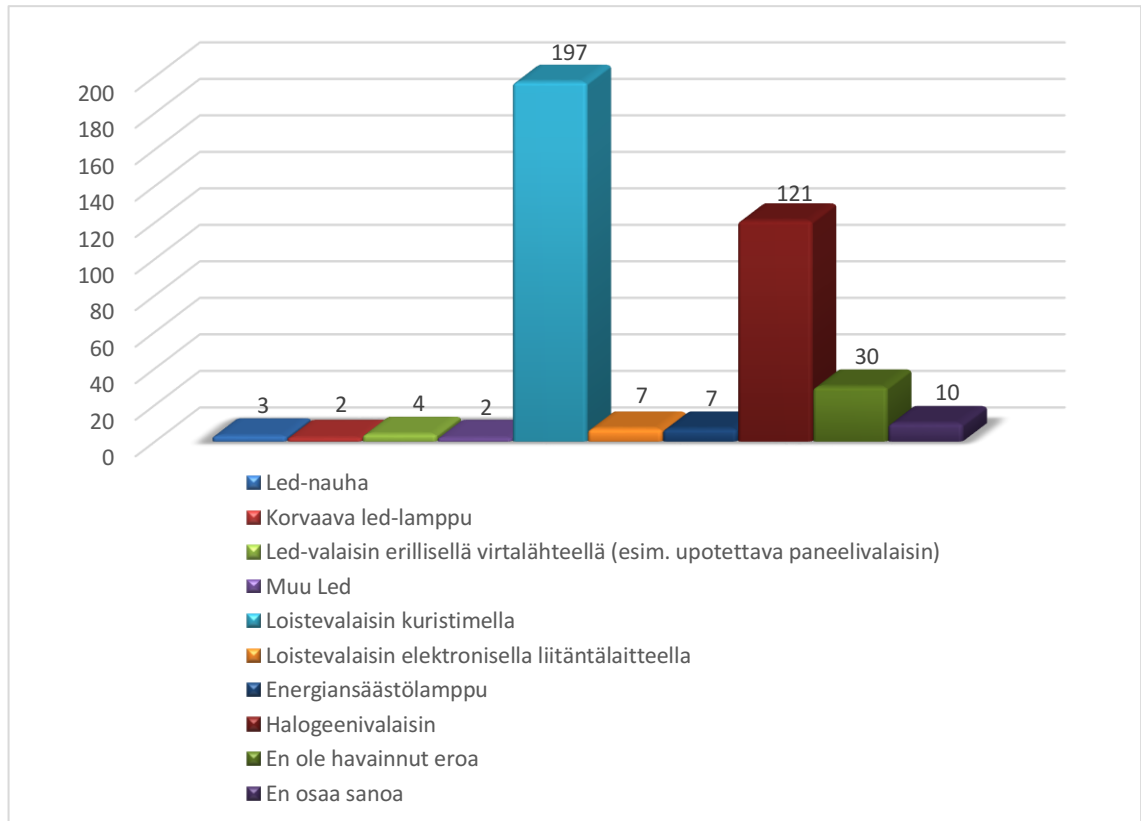
Kuvassa 86 on esitetty vastausten jakauma valaisinten aiheuttamista palo- tai sähköturvallisuuteen liittyvistä ongelmista. Noin puolet kyselyyn vastaajista on havainnut turvallisuusongelmia. Luku on yllättävän suuri.



**Kuva 86. Onko valaisimesta aiheutunut palo- tai sähköturvallisuuteen liittyviä ongelmia?**

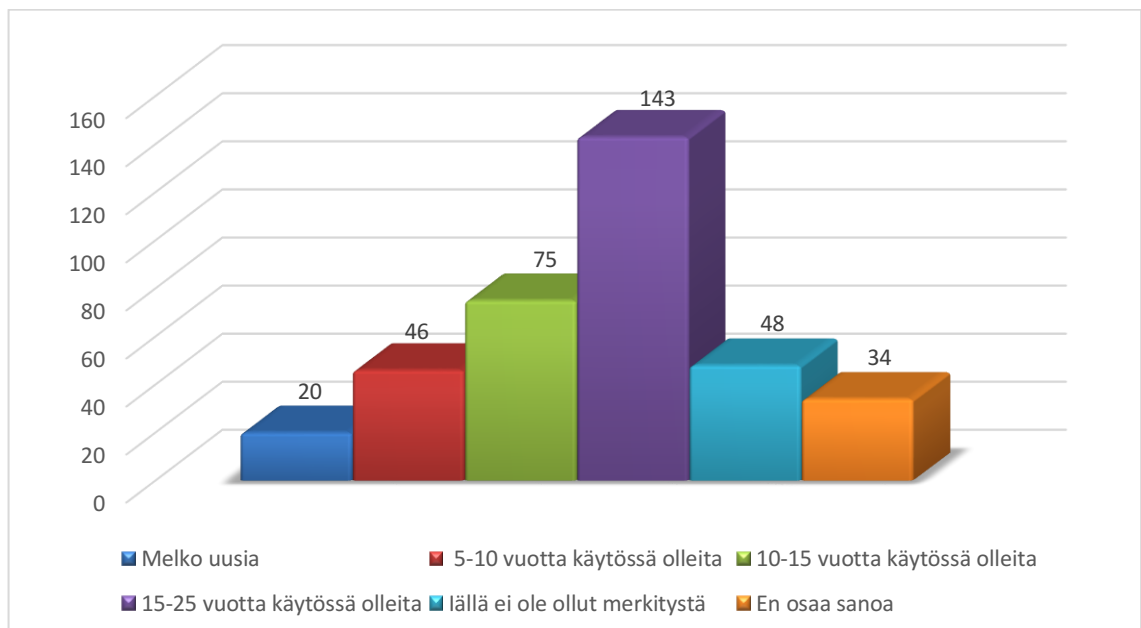
Vastausten tarkennuksina oli loistevalaisimien osalta mm. valaisimesta lähtenyt tulipalo, kuumana käyvän kuristimen sulattamat johdineristeet ja johtimen läpilyönti tämän seurauksena, kuristinpalot, vanhoissa asennuksissa uppovalaisimia ollut asennettuna palavien materiaalien sekaan, pienoisloistelamppujen syttyminen yli-/alijännitetilanteessa soihdumaisesti palamaan, johtimien hiiltymisen sekä energiansäästölamppujen kuumeneminen elinkaaren lopulla, jolloin lampunpidin vahingoittunut. Led-valaisimiin liittyviä tarkennuksia oli mm. led-nauha syttynyt palamaan johtimien ja nauhan liitoskohdasta sekä led-putken runkoon sulanut reikiä. Tarkennuksia saatiin lähes jokaiselta turvallisuusriskejä havainneelta vastaajalta.

Seuraavassa kuvassa 87 on eriteltyä palovaaran aiheuttaneen valaisimen tyyppi. Valaisintyypeistä suurin paloriski on selvästi ollut vanhan mallinen loistevalaisin, jossa virranrajoitus on toteutettu kuristimella. Halogeenivalaisimien pintalämpötila on myös aiheuttanut merkittävän määrän palovaaroja.



**Kuva 87. Oletteko havainnut, että tietyn tyyppinen valaisin aiheuttaisi helpommin/useammin palovaaran?**

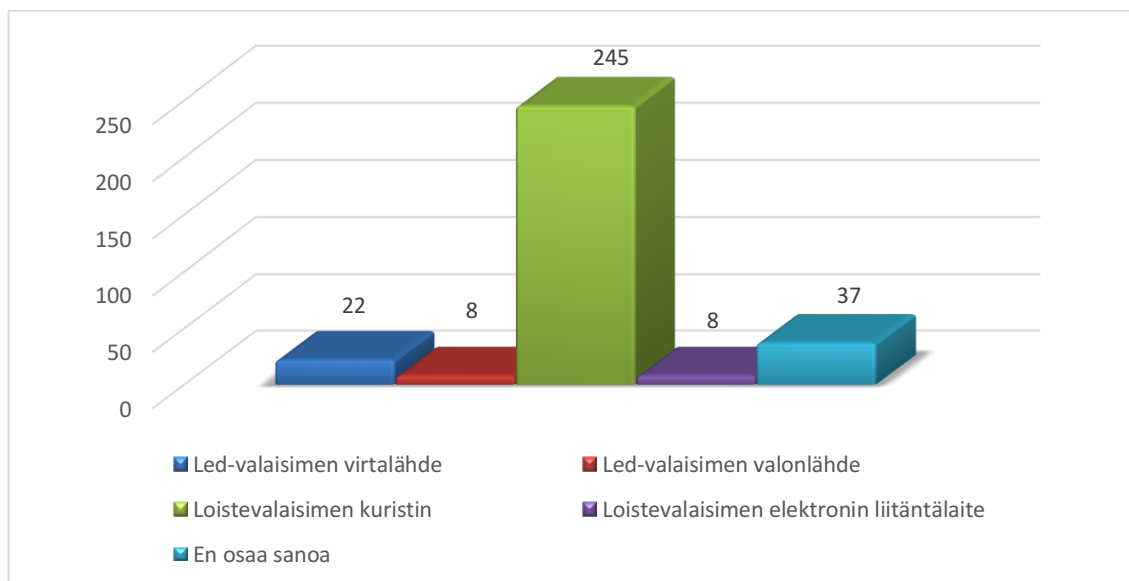
Led-tekniikan pientä osuutta palovaaroissa selittää osaltaan se, että tekniikka on vasta yleistymässä ja osaltaan muita valaisintekniikoita pienempi lämpenemä. Seuraavassa kuvassa 88 on esitettynä havaintojen jakaumaa valaisinten käyttöiän mukaan.



**Kuva 88. Oletteko havainnut, että palovaaran aiheuttavien valaisimien iällä olisi vaikutusta sen paloturvallisuuteen?**

Havainnoissa korostuu hyvin vahvasti, että mitä pidempään valaisimet ovat olleet käytössä, sitä enemmän niistä on aiheutunut palo- tai sähköturvallisuusriskejä. Valaisinten turvallisuutta voitaisiin parantaa tekemällä parempaa ennakoivaa kunnossapitoa koko elinkaaren ajan sekä poistamalla elinkaaren loppupuolella olevat valaisimet käytöstä, ennen kuin ne vikaantuvat.

Seuraavassa kuvassa 89 on esitetty havainnot tietyn valaisimen osan aiheuttamista palovaaroista. Loistevalaisimen kuristin on pahin turvallisuusriski, erityisesti ikääntymisen myötä.

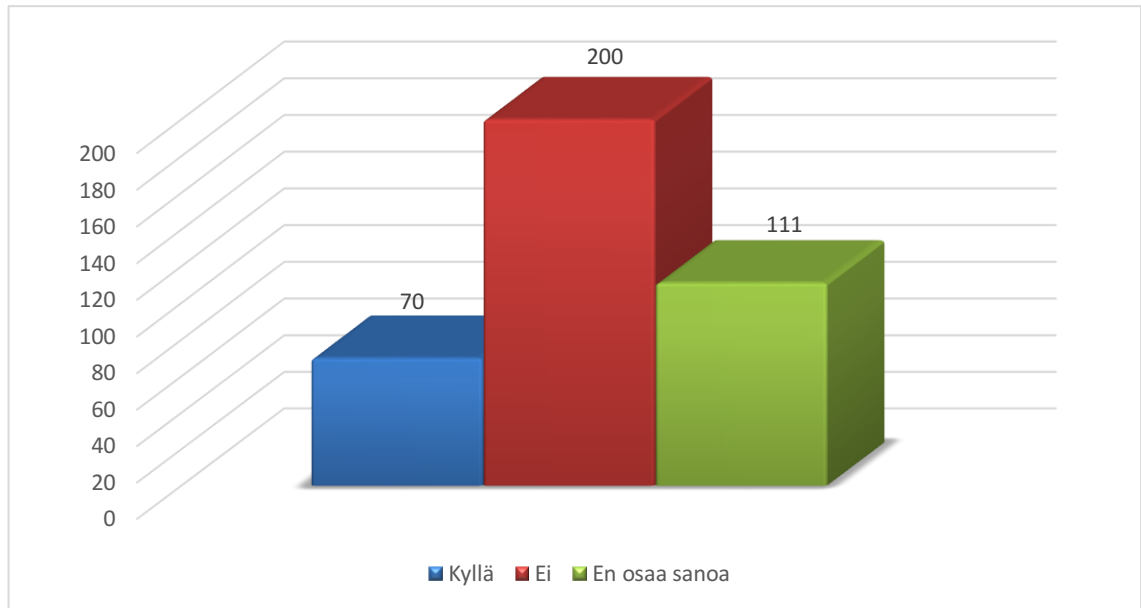


**Kuva 89. Oletteko havainnut, että erityisesti jokin valaisimen osa aiheuttaisi lämpenemistä/palovaaraa?**

Kysytyistä osista kuristin on ollut pahin turvallisuusriski, mutta avoimissa tarkennuksissa on myös toistuvaa mainintaa loisteputkista, jotka jäävät hehkumaan päistä, mutta eivät valaise.

Led-valaisimissa liitântälaitteen palovaaroja on havaittu niiden yleisyyden suhteen yllättävän paljon. Maahantuojilla ei välttämättä ole riittävää ymmärrystä liitântälaitteen ja led-valonlähteen yhteensopivuudesta. Nämä eivät välttämättä ole yhteensopivia, vaikka sähköiset ominaisuudet kilpiarvoissa vastaisivatkin toisiaan. Lisäksi maallikon mahdollisuudet tehdä asennusvirheitä, kuten asentaa liian pitkiä led-nauhoja liitântälaitteeseen voivat aiheuttaa vaaraa paloturvallisuudelle.

Seuraavassa kuvassa 90 on esitetty kohderyhmän kokemukset valaistuksen aiheuttamista häiriöistä muille sähköisille laitteille. Suurin osa vastaajista ei ole havainnut tai ei osaa sanoa. Häiriölähteen paikannus on vaikeaa, eikä valaistusta yleisesti pidetä häiriötekijänä.



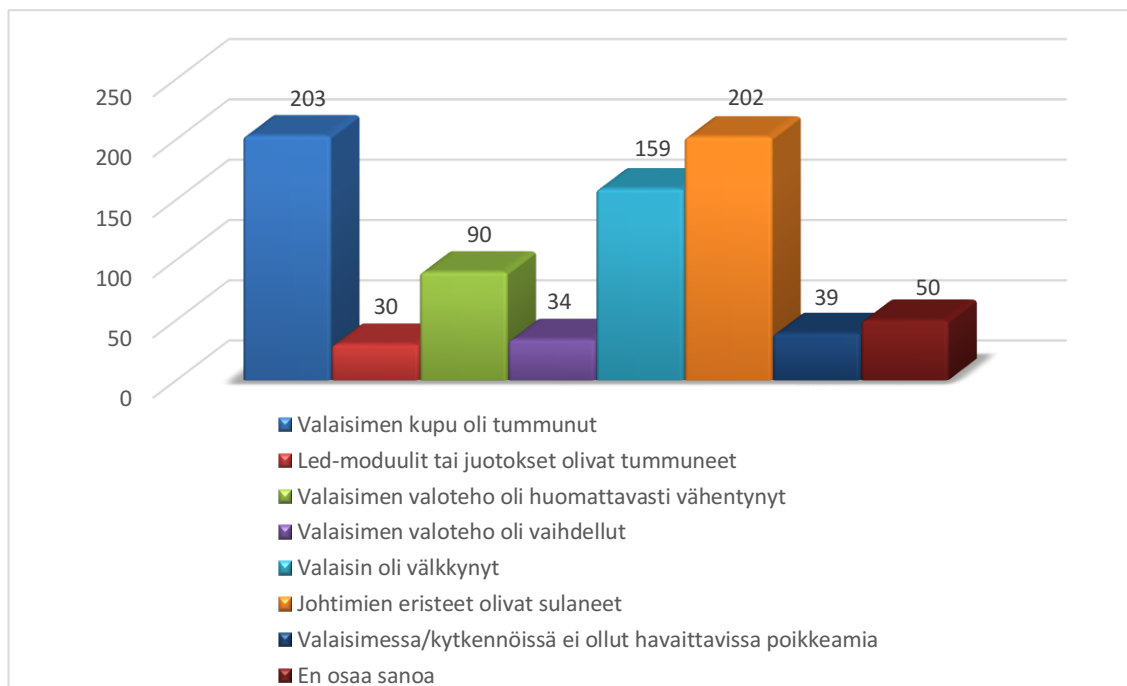
**Kuva 90. Oletteko havainnut, että valaistus häiritsisi muita laitteita (esim. etäluettavia mittareita)?**

Vastaajat, jotka ovat havainneet häiriöitä, ovat myös antaneet paljon tarkentavia vastauksia. Loisteputkien aiheuttamia häiriöitä on tarkennuksissa vain muutamia. Sen sijaan häiriöitä aiheuttavissa laitteissa korostuu led-tekniikkaa hyödyntävä valaistus. Ledit ovat aiheuttaneet häiriöitä mm. seuraaville laitteille:

- Radiohäiriöt, toistuva kommentti ja yleensä maininta, että ensimmäiset led-lamput ja häiriöt sittemmin vähentyneet
- Häiriöitä TV-kuvassa
- Erilaisia sensorilaitteita, jos valaistus ollut kytkettynä samassa ryhmässä
- Palovaroitinjärjestelmää
- PLC-luentaa

Käytetyt led-tekniikat ovat kehittyneet nopeasti ja EMC-häiriöt ovat vähenemään päin. Kuitenkin korkeataajuiset hakkuriteholähteet voivat edelleen aiheuttaa häiriöitä herkimmillä laitteilla. Led-valaistuksen osalta onkin hyvin vaikea selvittää, soveltuuko valittu valaisin suunniteltuun käyttöympäristöön.

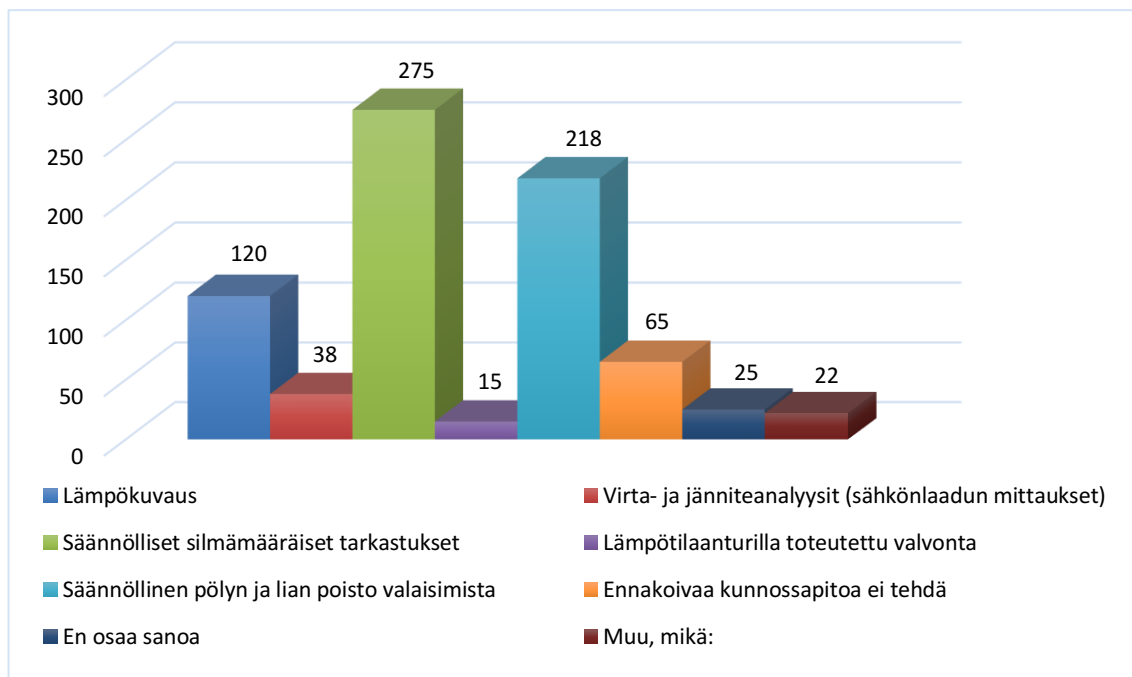
Seuraavassa kuvassa 91 on esitettyä mahdollisuuksia turvallisuusriskien ennaltaehkäisemiseksi. Suurimmassa osassa havaintoina on ollut mm. kuvun tummuminen, valotehon vaihtelu tai välkyntä. Johtimien eristeiden kunnon ja juotosten tummumisen olisi mahdollisesti havaittu ennakoivan valaisinhuollon avulla.



**Kuva 91. Onko valaisimessa havaittavissa/tiedossa ikääntymisen merkkejä, jotka huomioimalla palovaaralta/palolta olisi voitu välttää?**

Suurin osa aiheutuneista turvallisuusriskeistä olisi voitu välttää suorittamalla säännöllisempiä silmämääräisiä tarkistuksia. Valaistuksen kuntoon olisikin syytä kiinnittää nykyistä tarkempaa huomiota ja raportoida mahdollisista muutoksista ennen kuin vaaratilanne konkretisoituu.

Seuraavassa kuvassa 92 on esitetty vastaajaryhmän kokemuksia valaistukseen liittyvästä huolto- ja tarkastustoiminnasta. Koska vastaajia oli n. 400, jakaumasta voidaan havaita, että osassa kohteista käytössä on useampi kunnonvalvontajärjestelmä tai esimerkiksi sähköurakoitsija on valinnut useamman kohteen kunnonvalvontajärjestelmän.



**Kuva 92. Mitä seuraavista käytetään, jos tehdään valaistuksen tarkastus- tai huoltotoimintaa?**

Lämpökuvauksia tehdään yllättävän monessa kohteessa ja muita kysyttyjä sähköisiä valvontajärjestelmiäkin käytetään osassa kohteista. Jakaumassa on kuitenkin huomattava määrä (65 kpl) vastauksia, että ennakoivaa kunnossapitoa ei tehdä. Tarkennuksia muu, mikä: -kysymykseen on kirjattu muun muassa:

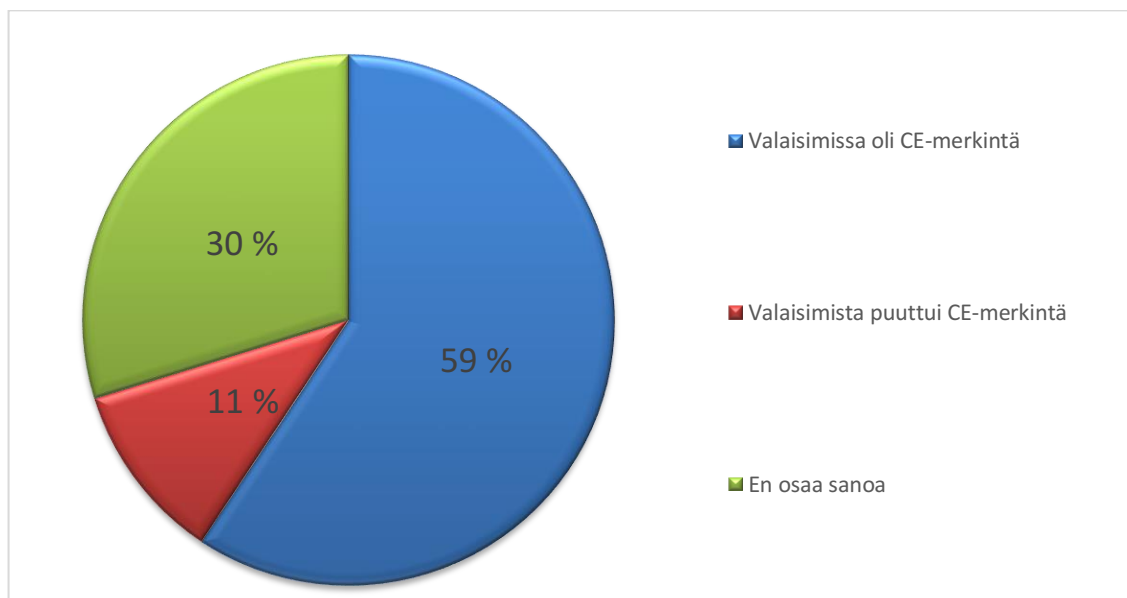
- Kunnossapito on vain putken vaihto
- Loistevalaisinten uusiminen aluekohtaisesti led-valaistukseksi
- Lämpökuvaus keskuksella, joka syöttää valaistusta
- Valaistusvoimakkuuden mittaus
- Lämpökuvaus ja eristysvastusmittaus, kun epäillään vikaa
- Epäsäännölliset silmämääräiset tarkistukset

Tietyissä tiloissa, kuten suuret julkiset rakennukset valaistuksen valvontaa ja kunnossapitoa ei tulisi laiminlyödä. Valaistus on kuitenkin hyvin suuri yksittäinen sähköisten tulipalojen aiheuttaja. Valaistuksen ennakoivaan kunnossapitoon tarvitaan uusia käytäntöjä. Käytäntöjen muuttaminen ei kuitenkaan välttämättä tuo juurikaan lisäkustannuksia. Kuten kuvasta 90 havaitaan, pelkällä säännöllisellä silmämääräisellä tarkastuksella voidaan kitkeä hyvin suuri osa valaistuksen aiheuttamista paloriskeistä. Menetelmiä mietittäessä tulee kiinnittää erityishuomiota valaisimen käyttöympäristöön. Mikäli tilassa on herkästi syttyviä materiaaleja, ei silmämääräiset tarkastukset riitä ainoaksi ennakoivaksi kunnossapidon menetelmäksi vaan pitää suorittaa tarkempia, säännöllisiä valaistuksen huolto- ja tarkastusmenetelmiä. Tarvittavat menetelmät tulee valita käyttöympäristön mukaan ja näitä voisi olla esimerkiksi säännöllinen pölyn ja lian poisto sekä lämpötilan seuranta joko lämpökameralla tai automaattisella valvontajärjestelmällä.



Vastaajaryhmän mukaan n. 84 % asennuksista oli tehty määräystenmukaisesti. Suurin osa valaisinten turvallisuusriskeistä johtuu riittämättömästä kunnonvalvonnasta sekä rakenteellisista virheistä tai käyttöiän mukana tapahtuvista muutoksista valaisimen toiminnassa.

Seuraavassa kuvassa 93 on esitetty kohderyhmän havainnot valaisinten CE-merkinnöistä. CE-merkinnällä ei voida sanoa olevan suoraa yhteyttä valaisimen turvallisuusriskeihin. CE-merkintä ei kuitenkaan takaa laitteen turvallisuutta.



**Kuva 93. Oliko valaisin CE-merkitty?**

Valaisimien määrä, joissa ei ollut CE-merkintää on hyvin pieni, n. 40 kappaletta. Toisaalta, ei voida tietää kuinka suuressa osassa valaisimia, joissa on merkintä, merkintä on CE-merkinnän väärennös, eli tuote ei täytä sitä koskevia määräyksiä tai ns. China Export-merkintä.

## 7.2 PRONTO-järjestelmän tulokset valaistuksen osalta

Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto PRONTO-järjestelmään kirjataan kaikki pelastustoimen pelastus- ja avunantotehtävät. Led-valaisimien aiheuttamia paloja ei rekisteriin kirjata luokiteltuna tietona, joten haku suoritettiin tekstikenttiin kirjoitettujen kuvausten perusteella. Pelastusviranomaisten yleiseen käytäntöön ei kuulu kirjata valaisinten tyyppiä.

Tarkasteltavaksi saatiin vain osa led-valaisimien paloista. Tällä tarkastelulla vuosilta 2009-2017 löytyi 28 tapausta, joissa tulipalon aiheuttaja oli kone tai laite, ja tekstikenttiin oli kirjoitettu, että palon aiheuttaja oli led-valaisin. Merkittävin havainto tässä tarkastelussa kuitenkin on se, että liitäntälaitte on syynä yli puoleen led-tekniikkaa hyödyntävän valaisimen paloon ja se, että palojen määrä on kasvussa. Tarkasteltaessa valaisimien aiheuttamien palojen määrää yhteensä taulukon 7 avulla, voidaan havaita, että led-valaisimet ovat silti merkittävästi perinteisiä valaisimia paloturvallisempia. Vuonna 2017 jolloin led-tekniikka on todella lyönyt läpi, palojen määrä on vähentynyt merkittävästi. Syynä tähän on todennäköisesti led-valaisimen pintalämpötila, vaikka joskus led-valaisimen erillistä liitäntälaitetta ei lasketa valaisimeksi ja siksi ei ole tässä tilastossa mukana.

***Taulukko 7. PRONTO-järjestelmään kirjatut tapaukset valaisinten osalta***

Vuosi	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Pelastustoimet vuosittain	205	195	220	226	233	223	242	216	163

Löydettyistä 28 palosta, joissa tekstikenttään oli kirjattu led-valaisin, palon aiheuttajana oli kiinteästi asennettu led-valaisin, 19 tapauksessa. Näistä viidessä tapauksessa syttyminen johtui led-valaisimelle tulevista sähköjohdoista tai liitoksista. Siten varsinainen led valaisin oli syynä 14 paloon. Yli puolet näistä oli liitäntälaitteen aiheuttamia [86].

## 8. YHTEENVETO

Tutkimus koostui neljästä osasta: teoriaosuudesta, laboratoriomittauksista, kenttämittauksista sekä kyselytutkimuksesta. Teoriaosuudessa vertaillaan eri valaisinratkaisuiden tunnuslukuja sekä esitellään yleisesti valaistukseen liittyviä termejä. Laboratoriomittauksissa tutkittiin korvaavien led-lamppujen, led-nauhojen ja erillisellä virtalähteellä varustettujen valaisinten lämpenemää. Mittauksia tehtiin myös vastaavilla energiansäästölamppuilla sekä halogeenilampuilla. Mittauksissa käytettiin ohjelmoitavaa jännitelähdettä, jolla voitiin tuottaa erilaisia katkoja sekä häiriöitä syöttöjännitteeseen. Sähkön laadulla ei ollut merkittävää vaikutusta lämpenemään, korkeataajuiset häiriöt aiheuttavat kuitenkin lisääntyviä häviöitä mm. kuristimissa. Yksittäisiin kuluttajatuotteisiin ei verkon jännitteenlaadulla ollut juurikaan vaikutusta. Yksikään led-lamppu ei vikaantunut testien aikana, toisinkuin energiansäästö- ja halogeenilamput. Laboratoriomittauksien yhteydessä havaittiin, että led-lamppu on käytännössä aina normaalisti toimiessaan pienempi paloturvallisuusriski, kuin muut testatut lampputekniikat. Led-lampun lämpenemä oli kaikissa tilanteissa alhaisempi. Led-nauhoilla testattiin myös mahdollinen vikatilanne, jossa led-nauhan päässä olevat avoimet + -ja - navat ovat oikosulussa. Tällöin hyvin monessa nauhassa virtalähde syöttää normaaliin tilanteeseen nähden moninkertaista virtaa. Tällöin ahtaisiin tiloihin ja lähelle herkästi syttyviä materiaaleja asennettu nauha on todellinen turvallisuusriski. Testeissä olleet nauhat ovat hyvin pienitehoisia, joten tilanne on entistä pahempi tehokkaammilla led-nauhoilla ja led-nauhoista onkin aiheutunut mm. teollisuuskiihteistön palo. Led-nauhojen asennusohjeissa on paljon puutteita, jolloin nauha voidaan asentaa ohjeiden mukaisesti vikatilaan. Laboratoriomittausten yhteydessä tarkasteltiin myös vaatimustenmukaisuusmerkintää. Nykyisellään CE-merkintä ei takaa laitteen turvallisuutta ja merkkiä väärennetään erittäin paljon. Lisäksi monista tuotteista löytyy China Export-merkinnäksi kutsuttu jäljitelmä, joka muistuttaa hyvin läheisesti CE-merkintää. Tarjolla on myös keinoja tarkastuttaa laitteen vaatimustenmukaisuus, mm. ENEC-laitoksissa.

Kenttämittauksissa tutkittiin valaistussaneerauksien vaikutuksia sähkönlaatuun. Kohteissa tehtiin mittaukset vanhoilla valaisintekniikoilla, mm. loisteputkilla ja monimetallivalaisimilla. Uudet mittaukset tehtiin samoissa kohteissa, kun niihin oli asennettu led-valaistus. Led-valaisimia saa lähes minkä tahansa vanhan tekniikan korvaajaksi ja näiden valaisimien laadussa on valtavasti eroja. Esimerkiksi led-putkissa havaittiin olevat huomattavia eroja. PFC-piirit sekä suotimet vaikuttavat valaisimen tehokertoimeen sekä virran käyrämuotoon. Led-putkia voidaan asentaa myös niin, että vanhat loisteputken kondensaattorit ja kuristin jätetään valaisinrunkoon. Tällöin valaisin on lähes kapasitiivinen kuorma. Tämän seurauksena valaisin ottaa hyvin suuren virran, josta suurin osa on loisvirtaa. Maakaapeloinnista ja induktiivisten kuormien vähenemisestä aiheutuva kapasitii-

vinen loisteho alkaa muutenkin olla sähköverkoissa kasvava ongelma. Virtaa voidaan pienentää poistamalla rungoista kondensaattorit. Tämä muutos kuitenkin poistaa valaisimen valmistajan vaatimustenmukaisuusvastuun ja siirtää sen muutostyön tekijälle. Lisäksi valaisimessa olevat merkinnät eivät ole voimassa ja muutostyön tekijän tulee korvata ne uusilla.

Led-valaisimille on ominaista erittäin suuri kytkentävirtasysäys. Kytchentävirtasysäyksestä saattaa aiheutua ongelmia yksinkertaisinta PLL-tekniikkaa, nollanylitystä, hyödynnäville laitteille. Lisäksi valaisinten korkea kytkentätaajuus on supraharmonisten alueella, 2-150 kHz. Kyseistä taajuusaluetta tutkitaan nyt erityisesti siitä syystä, että taajuusalueelle ei ole olemassa teknisiä standardeja, koskien häiriöiden amplitudeja sekä taajuuksia. Kyseistä taajuusaluetta käytetään yleisesti sähköverkkotiedonsiirtoon esim. sähköenergia- ja vesimittareissa. Standardissa EN-50160 otetaan kantaa harmonisiin yliaaltoihin 2kHz taajuuteen asti. EMC-standardit taas käsittelevät taajuusaluetta 150kHz taajuudesta ylöspäin. Supraharmonisia syntyy varsinkin hakkuriteholähteissä, joissa yleisesti kytkentätaajuus on 2-150kHz. Häiriöitä syntyy kytkentätaajuudella sekä tämän monikertojen läheisyydessä. Liiallisilla häiriöillä voi olla vaikutusta myös sähköverkkotiedonsiirrossa.

Kyselytutkimukseen vastasi noin 400 sähköalan ammattilaista, joista suurin osa oli sähköurakoitsijoita ja sähkölaitteistojen käytönjohtajia. Lähes puolet vastaajista oli havainnut ongelmia valaisimien sähkö- ja paloturvallisuudessa. Havaittuja riskejä olivat mm. valaisimesta aiheutuneet tulipalot, sähköiskuvaarat, palaneet/sulaneet johtimien eristeet, jolloin jäljelle ovat jääneet vain paljaat johtimet sekä loistevalaisimien kuristimien syttyminen ilmiliekkeihin. Suurin yksittäinen riskitekijä oli loistevalaisimen kuristin. Led-valaisimissakin erillinen tehollähde on syttynyt palamaan, led-putkiin sulanut reikiä ja led-nauha on syttynyt palamaan johtimien ja nauhan liitoskohdasta. Kyselyn perusteella iso osa turvallisuusriskeistä olisi voitu välttää tehokkaammalla ennakoivalla kunnossapidolla. Monessa tapauksessa olisi riittänyt vain silmämääräinen tarkempi tarkastelu, mutta osassa riskin huomaaminen olisi tullut esiin esimerkiksi loistevalaisimen putken vaihdon yhteydessä. Yllättävän moni vastaaja kertoi, että ennakoivaa kunnossapitoa tehdään mm. lämpökuvauksin. Liian monessa tapauksessa kunnossapito oli kuitenkin vain rikkiäisten valonlähteiden vaihto. Lisäksi led-valaistuksen on myös havaittu häiritsevän muita laitteita, mm. radiota, tv-kuvaa, palovaroitinjärjestelmää, etäluettavia AMR-mittareita sekä radio- ja kommunikointilaitteistoja.

Yhteenvetona tutkimuksessa kartoitettiin hyvin valaistukseen liittyviä turvallisuusriskejä sekä verkkovaikutuksia. Lisäksi tuotettiin aineistoa kuluttajaviestintään. Valaistus on suuri turvallisuuteen vaikuttava tekijä, mutta sitä ei aina osata ajatella turvallisuusriskinä. Led-valaisimissa havaittiin vielä paljon turvallisuuspuutteita sekä asennusohjepuutteita, vaikkakin normaalissa toiminnassa led on paloturvallisempi kuin edeltävät valaistustekniikat. Laitteiden CE-merkintä sellaisenaan ei takaa turvallisuutta, suurin osa led-valaisimista tulee suoraan Kiinasta ja niissä on jonkinlainen CE-merkintä. Tärkeimmissä koh-

teissa, kuten sairaaloissa valaisinten valinnassa olisi hyvä kiinnittää huomioita, onko valaisin tutkittu riippumattoman tutkimuslaitoksen toimesta, jolloin valaisimen olisi todettu täyttävän sille asetetut sen hetkiset vaatimukset. KytKentätaajuuden ja transienttien aiheuttamat häiriöt muille laitteille ovat vielä ongelmallisia, sillä standardia ei vielä ole supraharmonisten alueella. Elektronisten kuormien sopivuus vanhoihin rakennuksiin tulee tarkastaa, sillä vanhoissa asennuksissa nollajohdin voi olla mitoitettu liian pieneksi. Loisteputkien korvaamisen yhteydessä olisi suositeltavaa poistaa valaisinrungosta myös kuristin sekä kondensaattorit tehohäviöiden pienentämiseksi, tehokertoimen parantamiseksi. Mikäli näin ei tehdä, tulisi huomattavan loistehon tuoton vaikutus tarkastella keskitetyn kompensointilaitteiston kannalta. Lisäksi tästä voi aiheutua merkittävä kokonaisvirrankasvu ja johtimien lämpenemisiä. Joka tapauksessa tulisi varmistua, ettei led-valaistus aiheuta ongelmia valaisinasennusten kokonaisturvallisuuteen eikä uusi asennus aiheuta liiallista 3. yliaaltovirtaa nollajohtimeen. Loistevalaisimissa johtimien eristeiden ikääntyminen lämpenemän sekä UV-valon johdosta voi aiheuttaa suuren palo- ja sähköturvallisuusriskin. Riskiä voitaisiin pienentää käyttämällä uudenlaista valokaarisuojalaitetta. Led-valaistus on vielä kehitysasteella ja kuluttajan on täysin mahdotonta tietää, mikä valaisin on laadukas ja turvallinen.

## LÄHTEET

- [1] Sähköpalot, Tukes, 2017, Saatavissa: <http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-jahissit/sahkolaitteiden-paloturvallisuus/>
- [2] Laturit, verkkoliitäntäkojeet ja led-lamput lisäsivät vaarallisten sähkötuotteiden määrää viime vuonna, Tukes, 2013, Saatavissa: <http://www.tukes.fi/fi/Ajankoh-taista/Tiedotteet/Yleiset/Tukesin-lehdistotiedote-Laturit-verkkoliitanta-kojeet-ja-led-lamput-lisasivat-vaarallisten-sahkotuotteiden-maaraa-viime-vuonna-/>
- [3] J. Lehtonen, K. Ruuth, Sähköpostikeskustelut, If Vahinkovakuutusyhtiö Oy, 2017
- [4] Fingrid-lehti, Fingrid Oyj, 2016, Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/>
- [5] Sähköturvallisuuslaki STL 410/1996, Kauppa- ja teollisuusministeri A. Kallio-mäki, 1996, Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1996/19960410>
- [6] HE 116/2016 vp Hallituksen esitys eduskunnalle sähköturvallisuuslaiksi ja laiksi eräitä tuoteryhmiä koskevista ilmoitetuista laitoksista annetun lain muuttami-sesta, 2016, Saatavissa: <http://finlex.fi/fi/esitykset/he/2016/20160116.pdf>
- [7] Verkkopalveluehdot VPE 2014, Energiateollisuus ry, 2014, Saatavissa: [https://energia.fi/files/1055/Verkkopalveluehdot\\_VPE\\_2014\\_20160118.pdf](https://energia.fi/files/1055/Verkkopalveluehdot_VPE_2014_20160118.pdf)
- [8] Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet, SFS-EN 50160, 2011
- [9] ABB TTT-käsikirja 2000–07
- [10] Säröytyneen jännitteen käyrämuoto, Saatavissa: <http://www.pqsoft.com/wa-veforms/harm7.htm>
- [11] H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes, Instantaneous Power Theory and Appli-cations to Power Conditioning, 379 pages, Wiley 2007
- [12] B. Singh, A. Chanda, K. Al-Haddad, Power quality: Problems and Mitigation Techniques, Wiley, 2015, 596p.
- [13] R. Sastry Vedam, M. S. Sarma, Power quality – VAR compensation in power systems, CRC Press, 2008, 304p.

- [14] H. Hätönen, R. Alanen, Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta, State of art –selvitys, VTT, 2006
- [15] Fourier'n sarjakehitelmä, Saatavissa: <http://mathworld.wolfram.com/FourierSeriesSquareWave.html>
- [16] Electromagnetic Compatibility, IEC 61000, 2016
- [17] S. Chattopadhyay, M. Mitra, S. Sengupta, Electric power quality, Springer, 2011, 193p.
- [18] A. Baghini, Handbook of Power Quality, 2008
- [19] Transienttiylijännite, Saatavissa: <http://nepsi.com/>
- [20] X-P. Zhang, C. Rehtanz, B. Pal, Flexible AC transmission systems: Modeling and control, Springer, 2012, 569p.
- [21] R. C. Dugan, S. Santoso, M. McGranaghan, M. F. McGranaghan, H. Beaty, H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, 2002
- [22] K. R. Shailesh, T. Shailesh, Review of photometric flicker metrics and measurement methods for LED lighting, 2017 4th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, 2017, pp. 1-7.
- [23] A. Mörx, Electrically ignited fires in Low Voltage Installations, Eaton, 2016, Saatavissa: [http://electricalsector.eaton.com/en-gb\\_livesafe\\_whitepaper](http://electricalsector.eaton.com/en-gb_livesafe_whitepaper)
- [24] J. Ketola, Loistehon kompensointipariston muuttaminen opetuskäyttöön soveltuvaksi, TAMK, 2013, Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/56140/Ketola\\_Janne.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/56140/Ketola_Janne.pdf?sequence=1)
- [25] P. Verma, N. Patel, N-K. C. Nair, Demand side management perspective on the interaction between a non-ideal grid and residential LED lamps, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 23, 2017, s. 93-103
- [26] D. Agudelo-Martínez, M. Limas, A. Pavas, J. Bacca, Supraharmonic bands detection for low voltage devices, 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, 2016, pp. 1003-1009.
- [27] G. Singh, E. R. Collins, S. K. Rönnberg, E. O. A. Larsson, M. H. J. Bollen, Impact of high frequency conducted voltage disturbances on LED driver circuits, 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL, 2017, pp. 1-5.

- [28] W. Radasky, Emission Standardization in the 2-150 kHz Frequency Band, IEEE EMC Symposium, 2016, Saatavissa:  
[http://www.iec.ch/emc/emc\\_news/pdf/2016/july/4\\_Rochereau\\_77A\\_IEEE EMC\\_Symposium\\_July\\_2016.pdf](http://www.iec.ch/emc/emc_news/pdf/2016/july/4_Rochereau_77A_IEEE EMC_Symposium_July_2016.pdf)
- [29] Sisävalaistusstandardi SFS-EN 12464-1-2011, 2011
- [30] T. Kallasjoki, Valaistushankintojen energiatehokkuus, Kauppa- ja teollisuusministeriön (Työ- ja elinkeinoministeriön) suositukset julkisten hankintojen energiatehokkuudesta; valaistusosuuksien päivitys, Taustaraportti, Versio 4.0, 2008, Saatavissa: [http://www.valosto.com/tiedostot/SVS\\_Valaistushankintojen\\_energiatehokkuus\\_V4.pdf](http://www.valosto.com/tiedostot/SVS_Valaistushankintojen_energiatehokkuus_V4.pdf)
- [31] L. Hietalahti, Sähkövoimatekniikan perusteet, AMK-Kustannus Oy, 2013
- [32] Yleisiin valaistustarkoituksiin käytettävät ledituotteet. Termit ja määritelmät, SFS-EN 62504, 2016
- [33] Valaistussuunnittelijan käsikirja, Fagerhult, Saatavissa: [https://np.netpublicator.com/np/n30265811/tekniskinfo\\_FI\\_09.pdf](https://np.netpublicator.com/np/n30265811/tekniskinfo_FI_09.pdf)
- [34] Näin vertaillet ledivalaisimia 2.0, Teknologiateollisuus, 2013, Saatavissa: <https://valaistustieto.fi/valaistuksen-hankinta/nain-vertaillet-ledivalaisimia-2-0-opas-valmistunut/>
- [35] D1-2012 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista, STUL ry, 2012
- [36] P. A. Mäkinen, Kotelointiluokka kertoo sähkölaitteesta kaiken oleellisen, Sähköinfo Oy, 2015, Saatavissa: [http://www.sahkoala.fi/ammattilaiset/artikkelit/sahkokotekniikka/fi\\_FI/011015\\_kotelointiluokat/](http://www.sahkoala.fi/ammattilaiset/artikkelit/sahkokotekniikka/fi_FI/011015_kotelointiluokat/)
- [37] EU regulation (EC) No 244/2009, 2009, Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1419849329462&uri=CELEX%3A32009R0244>
- [38] EU regulation (EC) No 245/2009, 2009, Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1419849329462&uri=CELEX%3A32009R0245>
- [39] Loisteputken komponentit, muokattu, Saatavissa: <https://www.techintangent.com/fluorescent-light/>
- [40] D. Smith, Calculating the Emission Spectra from Common Light Sources, muokattu, 2016, Saatavissa: <https://www.comsol.com/blogs/calculating-the-emission-spectra-from-common-light-sources/>
- [41] R.S. Simpson, Lighting control technology and applications, 2003



- [42] Halogeenilamppu 28W E27, Saatavissa: <http://sahkoshop.com/halogeenipoltti-mot/105-halogeenilamppu-28w-e27.html>
- [43] T. Nurmi, Valaistustekniikka, Saatavissa: [http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/13valaistustekniikka.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/13valaistustekniikka.pdf)
- [44] Halogeenilampun spektri, muokattu, Saatavissa: <http://www.pointsdevue.com/article/blue-light-what-are-risks-our-eyes>
- [45] Kierrekantainen monimetallilamppu, Saatavissa: <https://grower-shouse.com/blog/understanding-hid-mhhs-grow-lights-lighting-buyers-guide>
- [46] Yleinen monimetallilampun spektri, muokattu, Saatavissa: <http://www.valo-netti.fi/sylvania-monimetallilamppu-standard-cmit-g12-70w-3000k-6700lm-p-3377.html>
- [47] Energiansäästölamppu, Motiva Oy, Saatavissa: <https://lampputieto.fi/lampun-valinta/alasivu/energiansaastolamppu/>
- [48] Energiansäästölamppu E27 14 W, Hong Kong, Saatavissa: <https://www.hong-kong.fi/fi/tyokalut-ja-nikkarointi/sahko-ja-lvi-tarvikkeet/lamput-ja-poltti-mot/energiansaastolamput/steinel-esl-14w-energiansaastolamppu-tunnistinvalaisimille/p/287009/>
- [49] Energy Efficient Lighting, Eartheasy, Saatavissa: <https://learn.eartheasy.com/guides/energy-efficient-lighting/>
- [50] Loistevalaisimen spektri, muokattu, 2017, Saatavissa: <http://www.sozialize.me/50538/fluorescent-light-color-spectrum-chart/modern-fluorescent-light-color-spectrum-chart-115-fluorescent-light-bulb-color-temperature-chart-fluorescent-light-spectrum-chart/>
- [51] T. Q. Khan, P. Bodrogi, Q. T. Vinh, LED Lighting: Technology and Perception, Weinheim: John Wiley & Sons, Incorporated, 2014
- [52] Fosforilla päällystetyn ledin spektri, muokattu, Saatavissa: <https://ideatoreality.wordpress.com/>
- [53] S. Winder, Power Supplies for LED Drivers, 2008
- [54] Analysis of Four DC-DC Converters in Equilibrium, 2015, Saatavissa: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/analysis-of-four-dc-dc-converters-in-equilibrium/>

- [55] A. Agrawal, K.C. Jana, A. Shrivastava, A review of different DC/DC converters for power quality improvement in LED lighting load, Proc. of International Conference on Energy Economics and Environment (ICEEE), 2015, pp. 1-6
- [56] T. Suntio, Switched-mode converters –course lecture slides, 2015
- [57] P. Green, Power Factor Correction Techniques in LED Lighting, 2011, Saatavissa: <https://www.ecnmag.com/product-release/2011/08/power-factor-correction-techniques-led-lighting>
- [58] LED Driver main elements, Texas Instruments, Saatavissa: [www.ti.com](http://www.ti.com)
- [59] Led-valoputket, Saatavissa: <http://leditalo.fi>
- [60] Korvaavia led-valoputkia Saatavissa: <https://tekniikanmaailma.fi/korvaatko-loisteputket-ledivalolla-putkia-kahdenlaisia-katso-kumpi-sopii/>
- [61] LED-valoputket loisteputkien korvaajina, Tukes, 2014
- [62] Led-lamppu E27 12.5 W, Ikea, Saatavissa: <http://www.ikea.com/fi/fi/catalog/products/60338452/>
- [63] Led-lamppu E27 4 W, Osram, Saatavissa: <https://www.power.fi/koti-ja-vapaa-aika/valaistus/osram-led-retro-4w827-e27-clear-40w-lamppu/p-255413/>
- [64] Led-valaisin 44 W, Saatavissa: <https://www.nettivalo.fi/LED-paneeli-44W-4182lm-4000K>
- [65] Led-valaisin 9 W, Saatavissa: [https://www.lamppukauppa.fi/led\\_alasvalo\\_9w](https://www.lamppukauppa.fi/led_alasvalo_9w)
- [66] Kymmenen asiaa, jotka sinun tulee tietää ledeistä, Glamox, 2013, Saatavissa: [https://glamox.com/upload/2013/09/26/fi\\_singlepages-2.pdf](https://glamox.com/upload/2013/09/26/fi_singlepages-2.pdf)
- [67] Z. Eng, Led strip lights: Two Main Heating Problems and Solutions, 2015, Saatavissa: <https://www.linkedin.com/pulse/led-strip-lights-two-main-heating-problems-solutions-zcers-eng>
- [68] Valaisimet. Osa 1: Yleiset vaatimukset ja testit, SFS-EN 60598-1, 2016
- [69] Led-valonheittimistä löytyi paljon puutteita, 2017, Saatavissa: <https://www.uusi-teknologia.fi/2017/09/12/led-valonheittimista-loytyi-paljon-puutteita/>
- [70] Vaatimustenmukaisuus-merkintä ja China Export-merkintä, Saatavissa: <http://il-maisenergia.info>
- [71] ENEC kotisivut, Saatavissa: [www.enec.com](http://www.enec.com)

- [72] P. Harsia, Nollajohtimen mitoitus, TAMK, 2013, Saatavissa: <http://tate.blogs.tamk.fi/sahkoinen-talotekniikka/johdon-mitoitus/ylivirtasuojaus/nollajohtimen-mitoitus/>
- [73] E. Csanyi, What are the consequences of high harmonic distortion levels?, 2014, Saatavissa: <http://electrical-engineering-portal.com/what-are-the-consequences-of-high-harmonic-distortion-levels>
- [74] M. Hossein Pourarab, N. Nakhodchi, M. Monfared, Harmonic analysis of led street lighting according to IEC61000-3-2; a case study, Proc. of 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED), 2015, pp. 1-4.
- [75] L. Stastny, R. Mego, L. Franek, Z. Bradac, Zero Cross Detection Using Phase Locked Loop, IFAC-PapersOnLine, Volume 49, Issue 25, 2016, s.294-298
- [76] A. M. Blanco, R. Stiegler, J. Meyer, Power quality disturbances caused by modern lighting equipment (CFL and LED), Proc. of IEEE Grenoble Conference, 2013, pp. 1-6.
- [77] A. Agrawal, K.C. Jana, A. Shrivastava, A review of different DC/DC converters for power quality improvement in LED lighting load, Proc. of International Conference on Energy Economics and Environment (ICEEE), 2015, pp. 1-6
- [78] E. F. Schubert, Light-Emitting Diodes, second edition. Cambridge, 2006
- [79] A. S. O. Ogunjuyibe, T. R. Ayodele, V.E. Idika, O. Ojo, Effect of lamp technologies on the power quality of electrical distribution network, Proc. of IEEE PES PowerAfrica, 2017, pp. 159-163.
- [80] D. De, S. Sahana, B. Roy, Performance analysis of fluorescent and led lamp system, Proc. of International Conference on Computer, Electrical & Communications Engineering (ICCECE), 2016, pp. 1-6.
- [81] S. K. Rönnberg, M. H. J. Bollen and M. Wahlberg, Harmonic emission before and after changing to LED and CFL — Part I: Laboratory measurements for a domestic customer, Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010, Bergamo, 2010, pp. 1-7.
- [82] S. Uddin, H. Shareef, A. Mohamed and M. A. Hannan, An analysis of harmonics from LED lamps, 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, Singapore, 2012, pp. 837-840.
- [83] S. K. Rönnberg, M. Wahlberg and M. H. J. Bollen, Harmonic emission before and after changing to LED and CFL — Part II: Field measurements for a hotel,

Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010, Bergamo, 2010, pp. 1-6.

- [84] S. K. Rönnerberg, M. Wahlberg, M. H. J. Bollen, Harmonic emission before and after changing to LED lamps — Field measurements for an urban area, 2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Hong Kong, 2012, pp. 552-557.
- [85] A. Dolara, R. Faranda, S. Guzzetti, S. Leva, Power quality in public lighting systems, Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010, Bergamo, 2010, pp. 1-7.
- [86] J. Ketola, Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto PRONTO. Pelastusopisto, 2018

**LIITE 1: WEBROPOL-KYSELY SÄHKÖALAN AMMATTILAISILLE****OSA A PERUSTIEDOT**

1. Mihin seuraavista ryhmistä ensisijaisesti kuulutte?
  - a) Palotutkijat
  - b) Valtuutetut sähkölaitteistotarkastajat
  - c) Sähkölaitteistojen käytönjohtajat
  - d) Sähköurakoitsijat
  - e) Pelastusviranomaiset
  - f) Muu, mikä \_\_\_\_\_?
2. Kuinka pitkään olette toimineet sähkölaitteistojen parissa?
  - a) 1-5 vuotta
  - b) 6-15 vuotta
  - c) 16-25 vuotta
  - d) yli 25 vuotta
  - e) Muu, mikä \_\_\_\_\_?

**OSA B YLEISET KOKEMUKSET VALAISTUKSESTA**

3. Oletteko havainnut, että tietyn tyyppinen valaisin aiheuttaisi helpommin/useammin palovaaran?
  - a) Led-nauha
  - b) Led-lamppu kierrekannalla
  - c) Led-valaisin erillisellä virtalähteellä (mm. upotettava paneelivalaisin)
  - d) Muu LED \_\_\_\_\_?
  - e) Loistevalaisin kuristimella
  - f) Loistevalaisin elektronisella liitäntälaitteella
  - g) Energiansäästölamppu
  - h) Halogeenivalaisin
  - i) En ole havainnut eroa
  - j) En osaa sanoa
4. Minkälainen oli vikaantuneen valaisimen kytkentätiheys?
  - a) Valaisin on lähes aina päällä
  - b) Valaisinta kytketään satunnaisesti, vain muutaman kerran päivässä
  - c) Valaisinta kytketään useasti päälle ja pois
  - d) Valaisinta ohjaa esim. liiketunnistin tai läsnäolotunnistin
  - e) En osaa sanoa
5. Oliko valaisin himmenninohjattu?
  - a) Kyllä
  - b) Ei

6. Oletteko havainnut, että palovaaran aiheuttavien valaisimien iällä olisi vaikutusta sen paloturvallisuuteen?
- Valaisimet ovat pääsääntöisesti melko uusia
  - Valaisimet ovat pääsääntöisesti 5-10 vuotta käytössä olleita
  - Valaisimet ovat 10-15 vuotta käytössä olleita
  - Valaisimet ovat 15-25 vuotta käytössä olleita
  - En osaa sanoa
  - Muu, mikä \_\_\_\_\_?
7. Oletteko havainnut, että erityisesti jokin valaisimen osa aiheuttaisi lämpenemistä/palovaaraa?
- Led-valaisimen virtalähde
  - Led-valaisimen valonlähde
  - Loistevalaisimen kuristin
  - Loistevalaisimen elektroninen liitäntälaitte
  - En osaa sanoa
  - Muu, mikä \_\_\_\_\_?
8. Oletteko havainnut, että valaisinten vikaantuminen olisi lisääntynyt, jos samalle keskukselle kytketyt valaisimet ovat erityyppisiä?  
(esim. kuristimella varustettuja loistevalaisimia sekä elektronisella liitäntälaitteella varustettuja valaisimia, mm. led tai loistevalaisin elektronisella liitäntälaitteella)
- Kyllä
  - Ei
  - En osaa sanoa
9. Oletteko havainnut, että valaistus häiritsisi muita laitteita (esim. etäluettavia mittareita)?
- Kyllä, tarkennus: \_\_\_\_\_
  - En ole havainnut vaikutuksia
  - En osaa sanoa
10. Mitä seuraavista toimenpiteistä käytetään, jos tehdään valaistuksen tarkastus- tai huoltotoimintaa? Voit valita useamman vaihtoehdon.
- Lämpökuvaus
  - Virta- ja jänniteanalyysit (sähkönlaadun mittaukset)
  - Säännölliset silmämääräiset tarkastukset
  - Lämpöanturilla toteutettu valvonta
  - Säännöllinen pölyn ja lian poisto valaisimista
  - Ennakoivaa kunnossapitoa ei tehdä
  - En osaa sanoa
  - Muu, mikä \_\_\_\_\_?

11. Onko valaisimesta aiheutunut palo- tai sähköturvallisuuteen liittyviä ongelmia?
- a) On, tarkennus: \_\_\_\_\_
  - b) Ei ole
  - c) En osaa sanoa

### **OSA C TAPAUSKOHTAISET KOKEMUKSET VALAISINPALOISTA/PALO-VAAROISTA**

12. Onko valaisimessa havaittavissa/tiedossa ikääntymisen merkkejä, jotka huomioimalla palovaaralta/palolta olisi voitu välttyä? Voit valita useamman vaihtoehdon.
- a) Valaisimen kupu oli tummunut
  - b) Led-moduulit tai juotokset ovat tummuneet
  - c) Valaisimen valoteho oli huomattavasti vähentynyt
  - d) Valaisimen valoteho oli vaihdellut
  - e) Valaisin oli välkkynyt. Kuinka pitkään välkyntää oli jatkunut? \_\_\_\_\_
  - f) Johtimien eristeet olivat sulaneet
  - g) Valaisimessa/kytkennöissä ei ollut havaittavissa poikkeamia, muuta kuin hälytyksen/palovaaran aiheuttava lämpeneminen
  - h) En osaa sanoa
  - i) Muu, mikä \_\_\_\_\_?
13. Mikäli paloriskin/palon syynä oli vanhaan loistevalaisinrunkoon asennettu LED-putki: Voit valita useamman vaihtoehdon
- a) Valaisinrungosta oli poistettu kompensointikondensaattorit
  - b) Valaisinrungosta oli poistettu kuristin
  - c) Valaisinrungolle ei ollut tehty mitään, vaihdettu vain valaisinputki ja sytytin
  - d) En osaa sanoa
  - e) En ole havainnut paloriskejä tai paloja led-putkien jälkiasennuksissa
14. Minkälaisessa asennusympäristössä valaisin on käytössä?
- a) Kuiva sisätila
  - b) Kosteaa sisätila (esim. kylpyhuone)
  - c) Kuuma/kosteaa tila (esim. sauna)
  - d) Ulkotila
  - e) Pölyinen ympäristö
  - f) Muut ilman epäpuhtaudet (esim. tehdasympäristö) \_\_\_\_\_

15. Oletteko havainnut, että vikaantuneen laitteen rungossa tai liitoksissa olisi vikaa (mm. haurastumia tai liitoksen löystyminen)?
- a) Kyllä, tarkennus: \_\_\_\_\_
  - b) En ole havainnut
  - c) En osaa sanoa
16. Minkälainen oli vikaantuneen valaisimen kytkentätiheys?
- a) Valaisin on lähes aina päällä
  - b) Valaisinta kytketään satunnaisesti, vain muutaman kerran päivässä
  - c) Valaisinta kytketään useasti päälle ja pois
  - d) Valaisinta ohjaa esim. liiketunnistin tai läsnäolotunnistin
17. Oliko valaisin himmenninohjattu?
- a) Kyllä
  - b) Ei
18. Minkälaisessa kiinteistöverkossa valaisin on kytkettynä?
- a) Vanha talo, jossa ei vielä valaisinryhmiä erikseen
  - b) Erillinen valaisinryhmä
  - c) En osaa sanoa
  - d) Muu, mikä: \_\_\_\_\_
19. Minkälaisessa sähköverkossa valaisin on kytkettynä?
- a) Heikko verkko (syrjäseutu)
  - b) Normaali verkko
  - c) Teollisuusverkko, jossa esim. suuria moottorikäyttöjä ja/tai taajuusmuuttajakäyttöjä (verkkohäiriöt yleisiä)
  - d) En osaa sanoa
  - e) Muu, mikä \_\_\_\_\_?
20. Olivatko valaisimien asennukset tehty määräystenmukaisesti?
- a) Olivat
  - b) Paloriskit olisi voitu välttää paremmalla asennuksella (asentajan virheet)
  - c) Paloriskit olisi voitu välttää paremmilla asennusohjeilla
  - d) En osaa sanoa
  - e) Muu, mikä: \_\_\_\_\_
21. Oliko valaisin CE-merkitty?
- a) Kyllä
  - b) Ei
  - c) En osaa sanoa
22. Omaan muutakin lisätietoa tai tutkimuskäyttöön soveltuvaa materiaalia, josta voisi olla hyötyä valaistuksen palo- ja sähköturvallisuuden tutkimuksessa. Minuun voi olla yhteydessä asian johdosta. Kaikki kyselyn tulokset ja materiaali



käsitellään nimettöminä ja niistä julkaistaan vain yhteenveto. Muu tutkimusmateriaali käsitellään ehdottoman luottamuksellisesti ja julkaistavista valokuvista tms. sovitaan aina erikseen materiaalin luovuttaneen tahon kanssa.

Nimi: \_\_\_\_\_

Yritys: \_\_\_\_\_

Tehtävä: \_\_\_\_\_

Sähköposti: \_\_\_\_\_

Puhelin: \_\_\_\_\_